

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Avaliação da viabilidade de um sistema de
ventilação natural: aplicação à sala de estudo do
Edifício I do ISCTE-IUL

Francisco Moreira de Carvalho

Dissertação

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

2015

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Avaliação da viabilidade de um sistema de
ventilação natural: aplicação à sala de estudo do
Edifício I do ISCTE-IUL

Francisco Moreira de Carvalho

Dissertação

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Trabalho realizado sob a supervisão de Professor Doutor Guilherme Carrilho da Graça (FCUL)

2015

ABSTRACT

The buildings sector accounted for 40% of final energy consumption in the EU in 2013. This makes it one of the main targets for the application of energy efficiency measures. In recent years there has been a reduction of energy consumption in this sector. However, this is more noticeable in domestic buildings than in office buildings, since any energy savings in this case have a greater impact on the occupants.

One of the goals of the developed work was to understand how energy is used in a service building. The studied building is located at a university campus and has various types of use, from bars to offices, classrooms and auditoriums. Some rationalization measures of energy consumption were also studied. From the dynamic simulation of a representative model of the analyzed building was possible to disaggregate energy consumption by end use. The total energy consumption is divided into 27% for lighting, 44% for cooling and 29% for equipment and others. Based on the energy performance regulation for this type of buildings, the building was classified as B-, it can become classified as B if the studied energy efficiency measures were applied.

It was also evaluated the potential use of a natural ventilation system in the building's Study Room. If a natural ventilation system is used, the comfort conditions are not guaranteed for the whole period of occupation. However it can do it in 90% of the occupied period without any energy consumption associated. In order to keep the interior comfort conditions during the hours of occupation of the Study Room, the use of a mechanical system results in an energy consumption of approximately 10.8 MWh. The possibility of using a hybrid system was also evaluated. For this case, preference is given to natural ventilation system and the mechanical system is only used as a backup option. When compared to a conventional mechanical system, this can achieve savings from 50% to 80%, depending on the inside temperature set point.

Keywords: Natural Ventilation; *EnergyPlus*; Dynamic Thermal Simulation; Energy Certification; *EnergyPlus*;

RESUMO

O sector dos edifícios foi responsável por cerca de 40% do consumo de energia final na União Europeia em 2013, tornando-o um dos principais focos de aplicação de medidas de eficiência energética. Nos últimos anos tem-se assistido a uma redução do consumo de energia neste sector, no entanto, esta é mais visível nos edifícios domésticos do que nos edifícios de serviços, uma vez que uma eventual poupança de energia neste caso tem um maior impacto junto dos ocupantes.

Um dos objetivos do presente trabalho consistiu em analisar de que forma a energia é utilizada a energia num edifício de serviços. O edifício em análise situa-se num campus universitário e tem espaços com diversos usos: bares, gabinetes e espaços onde decorrem atividades letivas. A partir da simulação dinâmica do edifício em estudo foi possível desagregar o consumo de energia por utilização final. Este divide-se em 27% para a iluminação, 44% para a climatização e 29% para equipamentos e outros. Com base no Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Edifícios, foi possível atribuir ao edifício a classe **B-**, que pode passar a classe **B** se forem aplicadas as medidas de racionalização do consumo de energia estudadas. Esta mudança de classe deve-se a uma diminuição do consumo de energia primária da ordem dos 35%.

Foi também avaliado o potencial de utilização de um sistema de ventilação natural na sala de estudo do edifício. A utilização de um sistema de ventilação natural não garante as condições de conforto ideais durante todo o período de ocupação, no entanto consegue fazê-lo em 90% das horas com ocupação sem nenhum consumo de energia associado. Para que se mantenham as condições interiores de conforto durante as horas de ocupação da sala de estudo, a utilização de um sistema mecânico resulta num consumo de energia de aproximadamente 10.8 MWh. Foi ainda avaliada a possibilidade de usar um sistema híbrido, no qual é dada primazia ao sistema de ventilação natural e o sistema mecânico apenas é utilizado como opção de recurso. Foram considerados dois cenários de condições de conforto interior, onde a poupança de energia face ao sistema mecânico convencional varia entre 50% e 80%, dependendo do intervalo de temperaturas interior considerado.

Palavras-chave: Ventilação Natural; *EnergyPlus*; Simulação Dinâmica; Certificação Energética;

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
2. MODELAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA EM EDIFÍCIOS	5
2.1. <i>Mecanismos de Transferência de Calor</i>	<i>5</i>
2.2. <i>Balanço Energético Interior de um Edifício</i>	<i>6</i>
2.3. <i>Ferramenta de Simulação Térmica</i>	<i>9</i>
3. VENTILAÇÃO DE EDIFÍCIOS	13
3.1. <i>Ventilação Natural</i>	<i>14</i>
3.2. <i>Ventilação Mecânica.....</i>	<i>18</i>
3.3. <i>Ventilação Híbrida.....</i>	<i>19</i>
4. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO	21
4.1. <i>Tipologia e Ocupação de Espaços</i>	<i>22</i>
4.2. <i>Soluções Construtivas</i>	<i>23</i>
4.3. <i>Sistemas de Climatização e Ventilação</i>	<i>28</i>
4.4. <i>Iluminação</i>	<i>33</i>
5. CERTIFICAÇÃO ENERGÉTICA DO EDIFÍCIO	35
5.1. <i>Modelo geométrico e zonamento térmico</i>	<i>35</i>
5.2. <i>Cargas Internas</i>	<i>36</i>
5.3. <i>Infiltração de ar exterior e condições fronteira</i>	<i>38</i>
5.4. <i>Climatização.....</i>	<i>38</i>
5.5. <i>Calibração do Modelo de Simulação Dinâmica.....</i>	<i>39</i>
5.6. <i>Desagregação de Consumos</i>	<i>42</i>
5.7. <i>Análise qualitativa do sistema de iluminação.....</i>	<i>43</i>
5.8. <i>Procedimento de Certificação</i>	<i>45</i>
5.9. <i>Medidas de Melhoria</i>	<i>48</i>
6. CASO DE ESTUDO – SALA DE ESTUDO DO EDIFÍCIO I.....	51
6.1. <i>Monitorização.....</i>	<i>51</i>
6.2. <i>Estimativa do Caudal de Ar Novo.....</i>	<i>55</i>
6.3. <i>Modelo Dinâmico de Simulação.....</i>	<i>57</i>
6.4. <i>Avaliação do desempenho dos diferentes sistemas de ventilação</i>	<i>61</i>
7. CONCLUSÕES.....	67
BIBLIOGRAFIA	69
ANEXO I	73

ANEXO II	75
ANEXO III	77
ANEXO IV	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo de energia final por sector em Portugal no ano de 2013, adaptado de [2].	2
Figura 2 – Mecanismos de Transferência de Calor, adaptado de [4];	5
Figura 3 – Componentes do balanço térmico num edifício, adaptado de [6];	7
Figura 4 – Diferentes fases do processo de simulação em EnergyPlus;	10
Figura 5 - Exemplo da interface geométrica do SketchUp 13;	10
Figura 6 – Tipos de ventilação natural conforme o tipo de abertura, adaptado de [25];	15
Figura 7 – Distribuição da pressão interior e exterior e localização do plano neutro, adaptado de [27];	16
Figura 8 – Distribuição das pressões na envolvente de um edifício em função do vento incidente, adaptado de [30];	17
Figura 9 – Exemplo de um sistema híbrido de climatização e ventilação, adaptado de [34];	19
Figura 10 – Vista aérea do Edifício I, Campus ISCTE-IUL [37];	21
Figura 11 – Esquema de divisão do edifício I	22
Figura 12 – Pormenor da envolvente exterior horizontal;	25
Figura 13 – Exemplo dos vãos envidraçados com vidro simples e do sombreamento, Piso 1 - Ala Norte;	26
Figura 14 – Exemplo dos radiadores existentes no edifício;	29
Figura 15 - Grupo térmico integral localizado na cobertura e que serve os auditórios;	30
Figura 16 – Unidades VRV que servem os gabinetes e corredores da reitoria;	31
Figura 17 - Distribuição da área iluminada pelos diferentes tipos de tecnologia;	34
Figura 18 - Modelo geométrico do edifício e edifícios envolventes, vista sudeste;	35
Figura 19 – Exemplo do zonamento correspondente às salas de aula;	36
Figura 20 – Exemplo de HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem e diferentes parâmetros que podem ser modelados.	39
Figura 21 – Desagregação dos consumos por tipo de utilização final	42
Figura 22 – Consumo de energia associado a cada um dos tipos de tecnologia de iluminação	43
Figura 23 – Sensor de luminosidade utilizado nas medições de iluminância	44
Figura 24 – Avaliação da qualidade da iluminação existente, percentagem de área correspondente a cada classe;	45
Figura 25 – Distribuição do consumo por utilização final, modelo previsto, à esq., e modelo de referência, à dir.	48
Figura 26 – Localização da sala de estudo (a vermelho) no Piso 1	51
Figura 27 – Equipamentos Utilizados na monitorização da sala de estudo	52
Figura 28 – Disposição dos equipamentos instalados	53
Figura 29 – Modelo de simulação da ala norte do edifício, onde se localiza a sala de estudo, vista sul;	58
Figura 30 – Comparação entre os dados registados e os dados obtidos por simulação, temperatura do ar interior;	59
Figura 31– Comparação entre os dados registados e os dados obtidos por simulação, concentração de CO ₂ ;	60
Figura 32 – Comparação entre os dados estimados e os dados obtidos por simulação, caudal de ventilação;	60
Figura 33 – Temperatura superficial da parede Norte;	61
Figura 34 – Temperatura superficial da parede Sul	61
Figura 35 – Perfil de radiação obtido para o dia 3 de Junho de 2014;	80

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Variação do consumo de energia final nos últimos em Portugal nos últimos 10 anos, adaptado de [2].	1
Gráfico 2 - Variação mensal do consumo e respetivo erro absoluto	41
Gráfico 3 - Temperatura do ar interior da sala de estudo e nº de Janelas abertas registados durante a monitorização	54
Gráfico 4 - Concentração de CO ₂ da sala de estudo e nº de ocupantes registados durante a monitorização	54
Gráfico 5 – Caudal de ventilação obtido em função da concentração de CO ₂ interior	56
Gráfico 6 – Temperatura interior nas horas com ocupação, sistema de ventilação exclusivamente natural;	62
Gráfico 7 - Temperatura interior nas horas com ocupação, sistema de ventilação exclusivamente mecânico;	63
Gráfico 8 - Temperatura interior nas horas com ocupação, sistema de ventilação híbrido para um intervalo de temperaturas mais restrito;	64
Gráfico 9 - Temperatura interior nas horas com ocupação, sistema de ventilação híbrido para um intervalo de temperaturas mais abrangente;	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limiares de proteção e margens de tolerância dos diferentes poluentes físico-químicos [21].....	13
Tabela 2 - Área correspondente a cada tipologia	22
Tabela 3 - Calendário referente ao ano civil de 2013	23
Tabela 4 - Constituição dos diferentes elementos construtivos e respetivos coeficientes de transmissão térmica.....	27
Tabela 5 – Condutividade e factor solar dos diferentes tipos de vãos envidraçados.....	27
Tabela 6 - Fatores a considerar no cálculo da eficiência do sistema, adaptado de [40];	28
Tabela 7 - Especificações técnicas dos equipamentos afetos aos auditórios	29
Tabela 8 - Especificações técnicas dos equipamentos afetos à reitoria	30
Tabela 9 - Especificações técnicas dos equipamentos afetos à Clínica	31
Tabela 10 – Especificações técnicas do equipamento existente nos Serviços Académicos	32
Tabela 11 – Especificações técnicas dos equipamentos existentes no Centro de Dados.....	33
Tabela 12 – Densidade de potência instalada por tipologia de espaço	34
Tabela 13 – Pressupostos assumidos em relação aos equipamentos existente no edifício.....	37
Tabela 14 – Comparação entre o consumo obtido através da primeira simulação e o consumo real	40
Tabela 15 – Comparação entre o consumo obtido através da simulação final e o consumo real	41
Tabela 16 - Classe energética e correspondente intervalo de IEE	46
Tabela 17 – Resumo dos valores obtidos referentes aos modelos de simulação dinâmica.....	47
Tabela 18 - Impacto da renovação do sistema de iluminação na classe energética	49
Tabela 19 - Impacto da substituição da caldeira na classe energética	50
Tabela 20 – Parâmetros característicos de cada um dos sistemas	66

1. Introdução

Nos últimos anos tem-se assistido a uma redução do consumo de energia final em Portugal, tal como pode ser observado no Gráfico 1. Esta diminuição é promovida essencialmente por dois fatores, o aumento da consciencialização acerca do uso da energia e o abrandamento da economia devido à crise financeira de 2008 [1].

No total, o consumo de energia final em Portugal passou de 19 Mtep (milhões de toneladas equivalentes de petróleo) em 2004 para 16 Mtep em 2013, o que corresponde a uma redução de cerca de 16% em dez anos. Esta diminuição é transversal a todos os sectores de atividade.

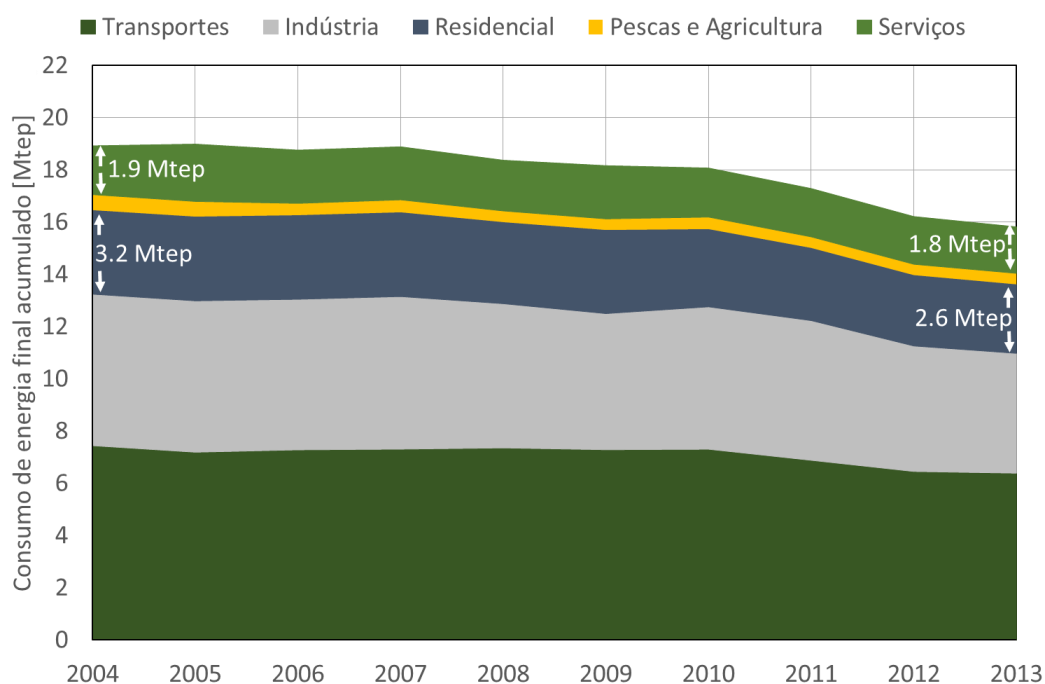


Gráfico 1 – Variação do consumo de energia final nos últimos em Portugal nos últimos 10 anos, adaptado de [2].

Em 2013, o sector dos edifícios foi responsável por cerca de 28% do consumo de energia final em Portugal, tendo-se registado nos últimos dez anos uma queda de cerca de 0.7 Mtep. Desta parcela, 87% são referentes aos edifícios residenciais, o que os torna nos maiores impulsionadores da redução do consumo de energia em edifícios. O consumo de energia final no sector residencial diminuiu aproximadamente 18%, enquanto que, no mesmo período, no sector dos serviços a redução foi de apenas 5%.

Este facto revela que a crescente preocupação em relação à redução do consumo de energia está bastante centrada no sector residencial, onde o incentivo à poupança é mais apelativo e as medidas de racionalização de eficiência energética são mais fáceis de aplicar. No sector dos serviços, o impacto da racionalização do consumo de energia não é tão evidente, como tal existe alguma displicência por parte dos ocupantes quanto ao uso de energia nos mesmos. Outro factor que pode ter influenciado uma menor redução do consumo de energia nos edifícios de serviços é a sua elevada dimensão comparativamente aos edifícios residenciais. Desta forma

torna-se mais difícil avaliar e implementar medidas que influenciem de forma significativa o desempenho energético do edifício. Uma vez que o peso de ambos sectores no de consumo energia final em Portugal é semelhante (Figura 1), deve ser incentivada a redução do consumo de energia também no sector dos edifícios de serviços.

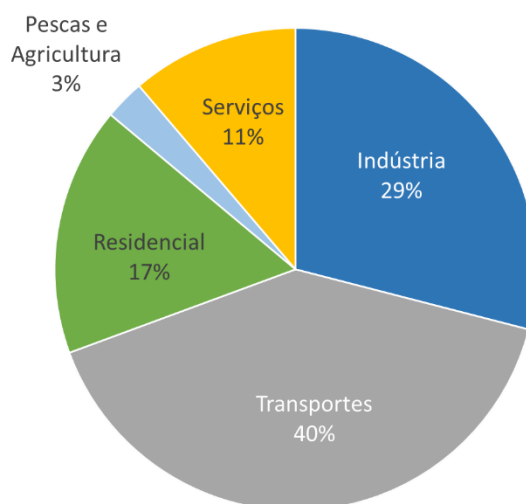


Figura 1 – Consumo de energia final por sector em Portugal no ano de 2013, adaptado de [2].

Para se proceder a uma avaliação do potencial de redução de consumo de energia de um edifício é necessário compreender de que forma a energia é utilizada no mesmo. O elevado consumo de energia pode dever-se a vários aspetos, entre eles: a baixa eficiência dos equipamentos utilizados, a incorreta utilização dos mesmos por parte dos ocupantes, as elevadas perdas de calor pela envolvente, etc.

Na generalidade dos edifícios não existe um registo do consumo de energia por tipo de utilização. Deste modo, a avaliação do seu desempenho energético torna-se complicada, uma vez que não é possível identificar a fonte de ineficiência de forma imediata. Esta dificuldade pode ser contornada recorrendo a ferramentas de simulação dinâmica de edifícios, que permitem analisar de que forma a energia é utilizada e prever o impacto de eventuais medidas de melhoria antes da sua aplicação.

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de identificar as fontes de consumo de energia de um edifício de serviços, mais concretamente o Edifício I do *campus* universitário ISCTE-IUL, em Lisboa. Com base na análise do consumo de energia será avaliado o desempenho energético e comparado com edifícios da mesma tipologia. Será também calculada a classe energética do Edifício I com base no Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços [3]. A partir da desagregação do consumo de energia será avaliada a implementação de diversas medidas de eficiência energética que permitam obter uma poupança de energia e uma respetiva melhoria da classe energética atribuída ao edifício.

Com o mesmo intuito, foi avaliado o potencial de utilização de ventilação natural na sala de estudo, localizada no piso 1 do mesmo edifício. Idealmente, o sistema de ventilação natural deverá garantir um caudal mínimo de ar novo capaz de manter uma boa qualidade do ar interior e condições de conforto térmico adequadas. No caso de não ser possível garantir as condições

interiores desejadas é necessário recorrer a um sistema auxiliar que permita alcançar uma situação de conforto interior. Será também analisado o desempenho energético destes sistemas complementares, permitindo assim um maior conhecimento sobre as alternativas existentes.

Assim, o presente trabalho pretende responder às seguintes questões:

- Como é utilizada a energia no edifício em estudo e de que forma esta pode ser racionalizada?
- Qual a classe energética do edifício?
- Qual o potencial de utilização de ventilação natural na sala de estudo em análise?
- Qual o consumo de energia associado às diferentes alternativas de sistemas de ventilação?

O presente documento encontra-se dividido em 7 capítulos principais. No primeiro capítulo é feita uma introdução ao trabalho realizado e quais os objetivos que se pretendem atingir. No Capítulo 2 são avaliados os mecanismos responsáveis pela transferência de calor e o seu impacto no balanço energético de um edifício. O terceiro capítulo descreve os diversos tipos de ventilação existentes e os princípios físicos em que os mesmos se baseiam. No Capítulo 4 é apresentado detalhadamente o edifício em estudo, mais concretamente o seu modo de funcionamento e os equipamentos existentes. No Capítulo 5 é abordada a metodologia utilizada na certificação energética do edifício e são analisadas potenciais medidas de racionalização do consumo de energia. No Capítulo 6 são apresentados os resultados da avaliação do potencial de utilização de ventilação natural na Sala de Estudo. Por último, no sétimo capítulo são apresentadas as conclusões obtidas depois da realização do presente trabalho.

2. Modelação de Transferência de energia em edifícios

2.1. Mecanismos de Transferência de Calor

A transferência de calor tem um papel fundamental no balanço energético de um edifício e como tal é necessário compreender os princípios físicos que a caracterizam.

Este fenómeno ocorre sempre que existem objetos com diferentes temperaturas, havendo uma transferência de energia térmica do corpo mais quente para o corpo com uma temperatura mais baixa. O equilíbrio térmico é atingido quando os corpos se encontram à mesma temperatura.

Existem três processos distintos (Figura 2) pelos quais pode ocorrer a transferência de calor:

1. Condução;
2. Convecção;
3. Radiação.

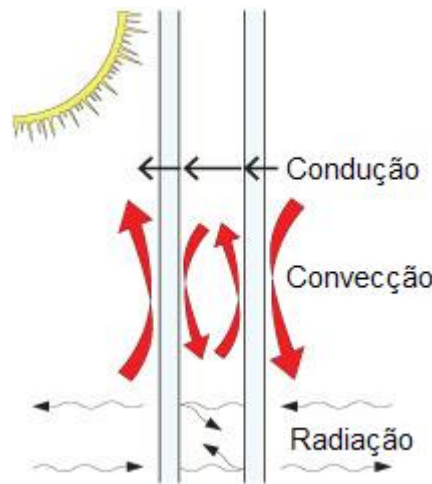


Figura 2 – Mecanismos de Transferência de Calor, adaptado de [4];

A **Condução** está associada à transferência de calor efetuada ao nível molecular, por transferência de energia sensível. As partículas mais energéticas transferem parte da sua energia vibracional por contacto com outras partículas menos energéticas. O calor transferido por unidade de tempo (\dot{q}_{cond} , W) é proporcional à área de transferência perpendicular ao fluxo de calor (A , m^2), e ao gradiente de temperaturas (dT/dx). A constante de proporcionalidade é uma propriedade física do material designada condutibilidade térmica (λ , $W/(m \cdot ^\circ C)$), que varia consoante o material em questão. O sinal negativo é necessário sempre que o gradiente seja negativo para que o calor, por convenção, tome um valor positivo. O fluxo de calor unidimensional transmitido por condução é traduzido pela seguinte lei de Fourier:

$$\dot{q}_{cond} = -(\lambda \cdot A) \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

A **Convecção** pressupõe a existência de um fluido que, devido ao seu movimento, acelera o processo de transferência de calor de uma superfície mais quente para um fluido mais frio. Esta transferência dá-se em simultâneo com a transferência de calor ao nível molecular (condução) sendo, no entanto, mais eficaz [5]. A transferência de calor por convecção (\dot{q}_{conv} , W) é expressa pela equação 2:

$$\dot{q}_{conv} = h_c \cdot A \cdot \Delta T \quad (2)$$

Onde:

- h_c – Coeficiente de transferência de calor convectivo, [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$];
- A – área perpendicular ao fluxo de calor, [m^2];
- ΔT – Diferença de temperaturas entre o fluido e a superfície.

A **Radiação Térmica** resulta da emissão de ondas eletromagnéticas (ou fótons) por alteração na configuração eletrónica de átomos e moléculas. Qualquer corpo com uma temperatura superior a 0 K emite energia radiante. A energia radiante que um corpo (\dot{q}_{rad} , W) emite é dada pela Lei de Stefan-Boltzmann aplicada a um corpo real, representada pela equação 3.

$$\dot{q}_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot T_S^4 \quad (3)$$

No entanto, uma vez que todas as superfícies emitem radiação térmica, o mais importante é conhecer o balanço da troca de energia radiante entre superfícies, dado pela equação 4.

$$\dot{q}_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_S^4 - T_{VIZ}^4) \quad (4)$$

Onde:

- - σ é a constante de Stefan-Boltzmann, $5,67 \times 10^{-8}$ [$W/(m^2 \cdot K^4)$];
- - ε é a emissividade da superfície, ($0 < \varepsilon \leq 1$);
- - T_S é a temperatura absoluta da superfície, [K];
- - T_{VIZ} é a temperatura absoluta das superfícies vizinhas, [K].

Este mecanismo tem uma maior importância para temperaturas mais elevadas, uma vez que a energia radiante emitida é proporcional à quarta potência da temperatura.

2.2. Balanço Energético Interior de um Edifício

Os mecanismos descritos anteriormente são aqueles que definem o balanço térmico de um edifício.

As propriedades construtivas da envolvente, os equipamentos utilizados, a ocupação dos espaços e a exposição solar são parâmetros que têm uma forte influência no comportamento térmico de um edifício. Como tal, todos estes fatores devem ser considerados no balanço térmico de um edifício. Na Figura 2 estão representados os componentes que podem influenciar este comportamento.

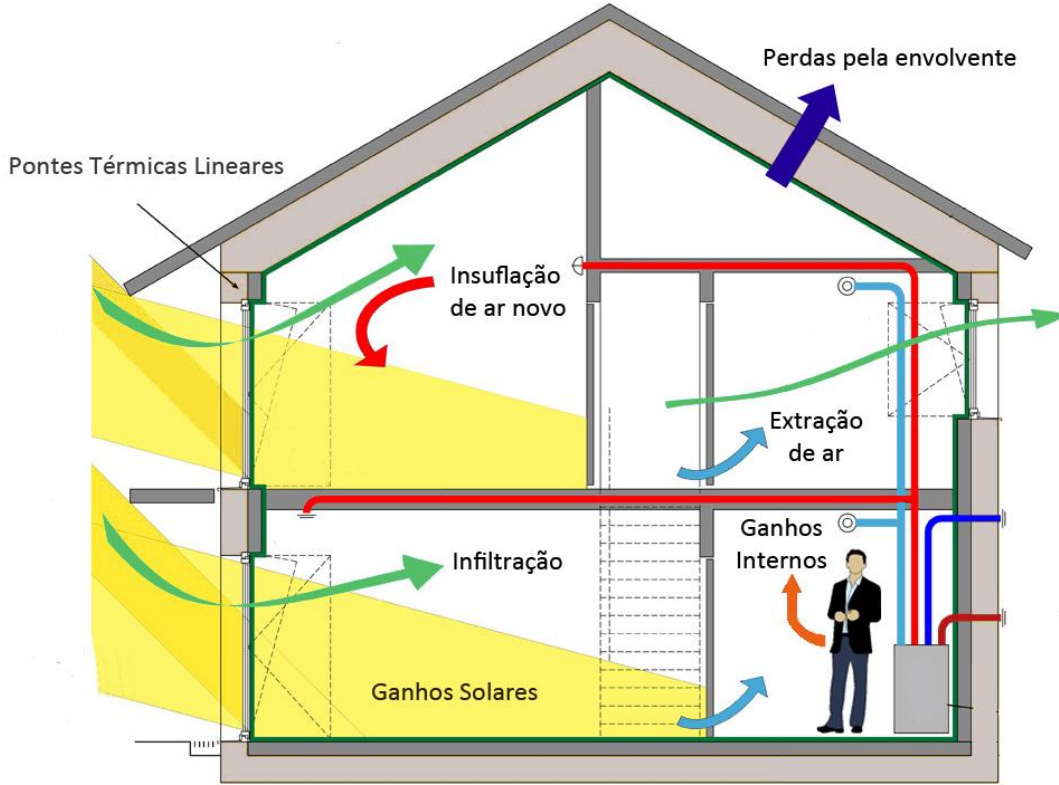


Figura 3 – Componentes do balanço térmico num edifício, adaptado de [6];

A equação 5 descreve, de um modo simplificado, este balanço. O primeiro termo depois da igualdade refere-se à energia armazenada no ar interior do espaço e o segundo termo é referente às perdas/ganhos de energia por transferência de calor pela envolvente.

$$G_s + G_i + G_v + G_c = \rho_{ar} \cdot C_{p_{ar}} \cdot V_{ar} \cdot \frac{\Delta T}{dt} + \sum_{n=1}^k A_n \cdot U_n \cdot (T_{int} - T_{ext}) \quad (5)$$

Onde:

- G_s – Ganhos solares, [W];
- G_i – Ganhos internos, [W];
- G_c – Ganhos de climatização, [W];
- G_v – Ganhos de ventilação, [W];
- ρ_{ar} – Massa volúmica do ar, [kg/m³];
- $C_{p_{ar}}$ – Calor específico do ar, [J/(kg.°C)];
- V_{ar} – Volume de ar existente no espaço, [m³];
- $\Delta T/dt$ – Variação de temperatura interior por unidade de tempo, [°C/s];
- A_n – Área de superfície da envolvente, [m²];
- U_n – Coeficiente de transmissão térmica da envolvente, [W/(m².°C)];
- T_{int} – Temperatura do ar Interior, [°C];
- T_{ext} – Temperatura do ar Exterior, [°C].

Em edifícios de serviços, os ganhos internos têm um forte peso na carga de arrefecimento [7], [8]. Neste tipo de edifícios, para além de uma elevada taxa de ocupação, os equipamentos existentes estão ligados durante longos períodos de tempo, contribuindo assim fortemente para o balanço energético do edifício.

Os ganhos solares devem-se essencialmente à incidência de radiação solar, direta ou indiretamente, na envolvente não opaca do edifício e dependem do recurso solar disponível e das características das superfícies não opacas. Esta componente do balanço térmico pode ser calculada através da equação 6.

$$G_s = A_v \cdot F_s \cdot (R_{directa} \cdot \cos(\alpha_s) \cdot \cos(\gamma_s) + F_f \cdot R_{difusa}) \quad (6)$$

Onde:

- A_v – Área de vão envidraçado, [m^2];
- F_s – Factor solar;
- $R_{directa}$ – Radiação direta, [W/m^2];
- α_s – Altitude solar, [$^\circ$];
- γ_s – Azimute solar, [$^\circ$];
- F_f – Factor de forma entre a janela e o céu;
- R_{difusa} – Radiação difusa, [W/m^2];

Um dos parâmetros com mais influência nos ganhos solares é o fator solar do vidro, que quantifica a totalidade de energia transmitida para o interior do edifício com origem na radiação solar, e é obtido através da razão entre o ganho de calor solar através do vidro e a radiação solar nele incidente [9].

Para compensar as trocas de energéticas mencionadas anteriormente e corrigir a temperatura do ar interior no caso de esta se encontrar fora do intervalo desejável, é necessário recorrer a um sistema de climatização. A energia despendida neste processo pode ser calculada a partir da equação 7.

$$G_c = \rho_{ar} \cdot C_{par} \cdot \dot{V}_{ins} \cdot (T_{ins} - T_{int}) \quad (7)$$

Onde:

\dot{V}_{ins} – Caudal de ar insuflado, [m^3/s]; T_{int} – Temperatura do ar Interior, [$^\circ C$];

A renovação do ar interior do edifício é necessária para a remoção dos poluentes emitidos pelos ocupantes, no caso de não existirem sistemas de climatização, podendo também desempenhar um papel importante no controlo da temperatura do ar interior. Uma vez que o ar exterior se encontra geralmente a uma temperatura diferente à desejada no interior, é necessário fornecer energia ao ar para que este possa ser insuflado para o interior do edifício. A equação 8 permite determinar a energia despendida no processo de ventilação.

$$G_v = \rho_{ar} \cdot C_{par} \cdot \dot{V}_{ins} \cdot (T_{int} - T_{ext}) \quad (8)$$

A ventilação do edifício pode ser classificada em três tipos diferentes, natural, mecânica ou híbrida, sendo este último uma combinação dos dois primeiros [10]. Estes três mecanismos serão discutidos mais à frente.

2.3. Ferramenta de Simulação Térmica

As equações apresentadas na secção anterior são de fácil resolução para instantes pontuais e no caso de se querer calcular o balanço energético para apenas um espaço. No entanto, se o objetivo for analisar o comportamento térmico de um edifício por períodos de tempo mais longos, como por exemplo um mês ou um ano, esta abordagem mais simples não é tão prática. Uma das abordagens a considerar é o recurso a ferramentas de simulação dinâmica, que permitem que seja efetuado o balanço energético de todo o edifício independentemente do número de espaços considerados e do período de tempo que se pretende analisar. Estas ferramentas têm vindo a estar mais presentes na fase de projeto dos edifícios nos últimos anos, devido a uma maior noção do impacto que esta etapa pode ter no consumo de um edifício durante o seu período de vida [11].

A ferramenta de simulação dinâmica escolhida foi o *software EnergyPlus 8.1.0.009*. O *EnergyPlus* é uma ferramenta de análise energética de simulação de carga térmica que a partir de um modelo geométrico do edifício em análise permite calcular as cargas de aquecimento e arrefecimento para que sejam mantidas condições interiores desejadas, bem como o consumo de energia associado aos diferentes equipamentos existentes.

A utilização deste programa deve respeitar uma série de fases, desde a construção de um modelo até à sua simulação (Figura 4). Inicialmente é construído o modelo geométrico do edificado, de seguida são definidas as propriedades dos seus materiais constituintes e os parâmetros que o definem tanto o ambiente exterior (ficheiro climático, localização geográfica, orientação, etc.) como o interior (sombreamento, ocupação, iluminação, infiltração, temperaturas de conforto térmico, etc.). Em conjunto com estes parâmetros é utilizado um ficheiro climático representativo do clima local, que pode ser obtido no *website* do *EnergyPlus* [12]. O clima local tem uma forte influência nas condições de conforto interior de um edifício, como tal é um factor preponderante na análise do desempenho energético do mesmo. Depois de agregada toda a informação que define o modelo procede-se à simulação do mesmo, que resulta da interação entre os sistemas existentes no edifício e os balanços energéticos do ar interior e das superfícies.

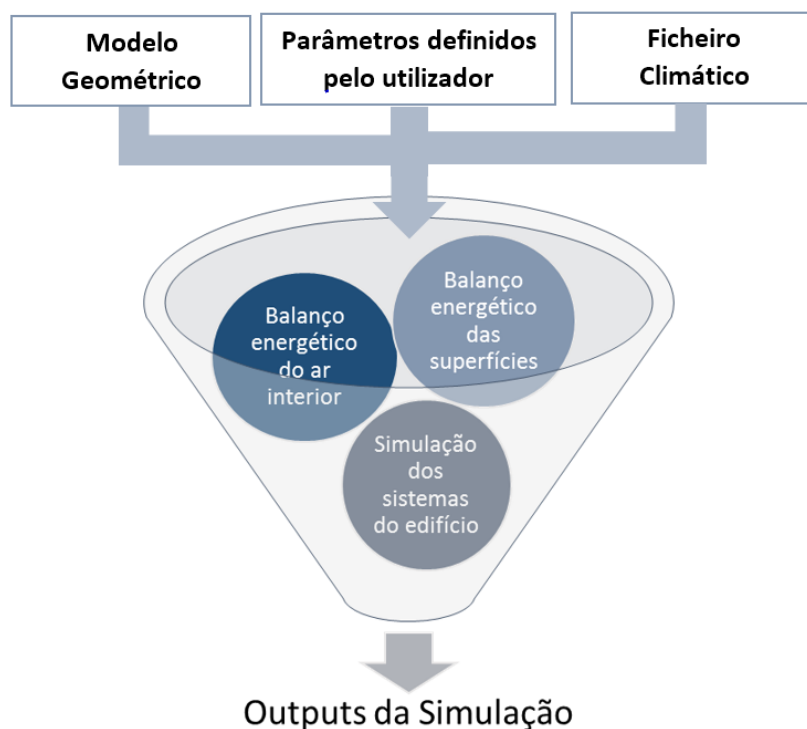


Figura 4 – Diferentes fases do processo de simulação em *EnergyPlus*;

Os dados resultantes da simulação dinâmica são bastante abrangentes, sendo possível obter desde a temperatura interior de cada uma das zonas, à radiação solar que passa pelos vãos envidraçados ou o consumo de energia devido aos equipamentos elétricos. A resolução temporal dos resultados é definida pelo utilizador, pode variar entre um minuto e um ano.

A construção do modelo geométrico foi feita através do *software Sketchup v13.0.3689*, que funciona de forma articulada com o *EnergyPlus* utilizado através do *plug-in OpenStudio*. Esta articulação permite que a geometria do modelo seja construída numa interface gráfica (Figura 5), ao contrário do que acontece quando esta é definida diretamente no *EnergyPlus*. Desta forma o processo torna-se mais apelativo, facilitando a divisão do edifício em zonas térmicas distintas.

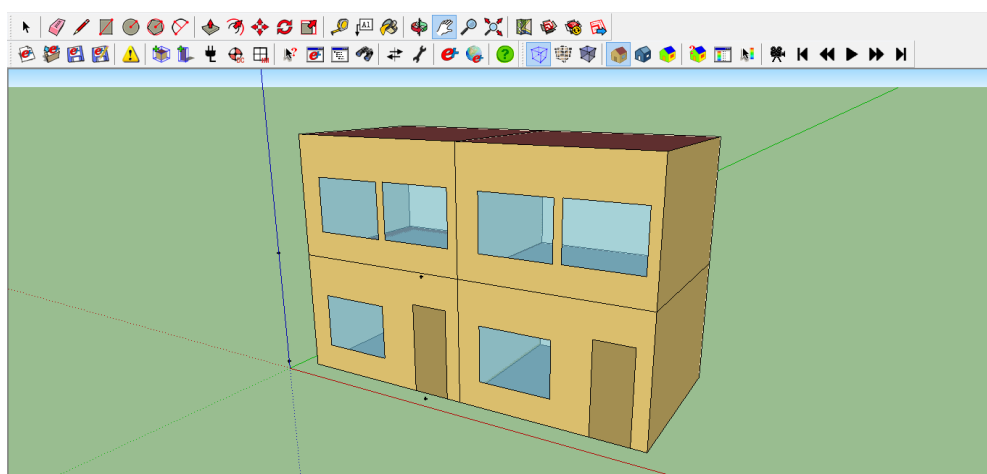


Figura 5 - Exemplo da interface geométrica do *SketchUp 13*;

Os dados climáticos utilizados para a certificação do Edifício I foram obtidos através da aplicação “CLIMA-SCE”, disponibilizada pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) [13]. O dados incluem informação horária de várias grandezas relevantes para o comportamento térmico do edifício, tais como a temperatura exterior de bolbo seco e bolbo húmido, a humidade relativa exterior, a radiação solar direta e radiação solar difusa, e representam um ano típico de Lisboa, obtido com base em dados dos últimos 30 anos. Segundo o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Edifícios, a resolução temporal mínima para o cálculo da classe energética é horária. Estes parâmetros são os necessários para o cálculo do balanço térmico do *EnergyPlus*, que é feito através da equação 9 [14]:

$$C_z \cdot \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i \cdot A_i \cdot (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i \cdot C_p \cdot (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} \cdot C_p \cdot (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (9)$$

Onde:

- $\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ representa a soma dos ganhos convectivos;
- $\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i \cdot A_i \cdot (T_{si} - T_z)$ contabiliza as trocas de calor convectivas entre o ar interior e as superfícies envolventes;
- $\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i \cdot C_p \cdot (T_{zi} - T_z)$ corresponde à transferência de calor devido à mistura do ar interior;
- $\dot{m}_{inf} \cdot C_p \cdot (T_{\infty} - T_z)$ representa a transferência de calor devido à infiltração de ar exterior;
- \dot{Q}_{sys} é a energia fornecida pelo sistema climatização;
- $C_z \cdot \frac{dT_z}{dt}$ corresponde à energia armazenada no ar interior.

Para simplificar o cálculo do balanço térmico, é assumido que a massa de ar presente em cada zona térmica se encontra numa mistura perfeita e é apresentando apenas uma temperatura homogénea em toda a zona [15], que corresponde ao parâmetro T_z presente na equação 9.

3. Ventilação de edifícios

A qualidade do ambiente interior de um edifício não se caracteriza apenas pelo conforto térmico, mas também pela qualidade do ar interior e pela iluminação dos espaços [14, 15]. É neste aspeto que a renovação do ar interior tem uma grande relevância, uma vez que permite a remoção dos poluentes emitidos pelos ocupantes.

Em ambientes académicos, para além de afetar o conforto e a saúde dos ocupantes, a qualidade do ar interior tem também impacto nas capacidades cognitivas dos mesmos [16, 17], afetando desta forma o processo de aprendizagem dos alunos e a produtividade dos docentes. Tendo em conta o tipo de atividade desenvolvido nos estabelecimentos de ensino, e uma vez que em geral as salas de aula têm uma elevada densidade de ocupação, um dos parâmetros com mais impacto no processo de aprendizagem é a concentração de dióxido de carbono (CO₂) [20]. Normalmente os limites de concentração dos diversos poluentes são definidos por legislação específica.

Na legislação portuguesa [21] estão definidos limiares de proteção para diversos poluentes, tal como apresentado na Tabela 1. Os limites apresentados são referentes a edifícios novos ou sujeitos a grandes intervenções, no caso de edifícios existentes ou sem ventilação mecânica existe uma margem de tolerância aplicável, também ela definida em função do tipo de poluente. Os limiares de concentração indicados dizem respeito à concentração média do poluente em questão nas 8 horas anteriores e não a valores pontuais.

Tabela 1 – Limiares de proteção e margens de tolerância dos diferentes poluentes físico-químicos [21]

Poluentes	Unidade	Limiar de proteção	Margem de tolerância (MT) [%]
Partículas em suspensão (fração PM ₁₀)	[µg/m ³]	50	100
Partículas em suspensão (fração PM _{2.5})	[µg/m ³]	25	100
Compostos Orgânicos Voláteis Totais (COVs)	[µg/m ³]	600	100
Monóxido de Carbono (CO)	[µg/m ³]	10	-
	[ppmv]	9	
Formaldeído (CH ₂ O)	[µg/m ³]	100	-
	[ppmv]	0.08	
Dióxido de carbono (CO ₂)	[µg/m ³]	2250	30
	[ppmv]	1250	
Radão	[Bq/m ³]	400	-

O controlo da qualidade do ar interior é geralmente feito através da ventilação do edifício de modo a renovar o ar interior e remover os poluentes existentes. Esta ventilação pode ser feita através de diferentes tipos de mecanismos, aproveitando os recursos naturais ou utilizando equipamentos que procedam à remoção e tratamento do ar.

Nas próximas secções serão analisados os processos físico referentes aos diferentes tipos de ventilação e quais as vantagens que os mesmos apresentam.

3.1. Ventilação Natural

Um edifício considera-se naturalmente ventilado sempre que a renovação do ar interior é feita exclusivamente com recursos naturais, não recorrendo a qualquer equipamento mecânico. A utilização deste tipo de ventilação pode levar à redução do consumo energético associado à ventilação e climatização. Caso não sejam garantidas as condições propícias ao uso de ventilação natural, este pode ter o efeito inverso levando ao aumento do consumo de energia. A definição de quais as condições ideais para o uso de ventilação natural depende bastante do uso que é dado ao edifício, das condições que se deseja manter no seu interior e da localização do mesmo (ruído, clima, poluição, etc.). Tipicamente a ventilação natural deverá ser utilizada quando a temperatura exterior se encontra dentro dos limites definidos para a temperatura do ar interior. No entanto, quando a temperatura do ar exterior se encontra próxima do limite superior, poderá não ser vantajosa a utilização da ventilação natural, uma vez que aliado aos ganhos internos, rapidamente a temperatura excederá o limite de conforto. Este mecanismo pode originar também uma poupança monetária reduzindo o custo de operação do edifício.

Uma das potencialidades do uso da ventilação natural é o arrefecimento noturno de edifícios de serviços na estação de arrefecimento, aproveitando desta forma a menor temperatura do ar exterior durante a noite para baixar a temperatura do ar interior. Esta redução leva a que, no início do período com ocupação, a temperatura seja mais baixa e demore mais tempo a atingir temperaturas que excedam o limite de conforto, reduzindo também o número de horas em que esse limite é ultrapassado. Durante o período com ocupação, o arrefecimento permite diminuir, no imediato, as necessidades de arrefecimento, contribuindo para reduzir o efeito dos ganhos de calor, como por exemplo os ganhos internos ou os ganhos solares. Em climas temperados, como no caso de Portugal, em que os edifícios de serviços têm necessidades de arrefecimento durante praticamente todo o ano, o potencial de poupança energética devido à utilização de ventilação natural pode ser da ordem dos 30% [22].

O estudo da ventilação natural pode ser dividido em duas grandes áreas, uma referente aos fluxos de ar através da envolvente, que estuda a forma como o ar entra e sai do edifício, e outra referente ao movimento do ar interior. A ventilação pode ser classificada conforme a disposição das aberturas, em *single sided*, com uma (Figura 6a) ou duas aberturas (Figura 6b), ou cruzada, com aberturas em paredes contíguas (Figura 6c) ou em parede opostas (Figura 6d).

Os fluxos de ar através da envolvente derivam de diferenças de pressão entre o interior e o exterior, geradas pelo vento e/ou pela diferença de temperatura do ar. Estes processos são descritos pelas equações de Navier-Stokes [23], no entanto devido à sua enorme complexidade é comum assumir algumas simplificações no cálculo desses fluxos. Se for considerado que o escoamento se encontra completamente desenvolvido e em estado estacionário, o caudal de ventilação (Q) pode ser calculado através da equação 10 [24]. Esta equação deriva da equação de *Bernoulli* e pressupõe que se trata de um fluxo invíscido e incompressível, ou seja sem viscosidade e sem variação da densidade do fluido.

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (10)$$

Onde:

- C_d é o coeficiente de descarga, que depende do tipo de abertura por onde passa o escoamento;
- A é a área de secção da abertura [m^2];
- Δp é a diferença de pressão nos dois lados da abertura [Pa];
- ρ é a densidade do fluido, [kg/m^3].

A diferença de pressão pode ter origem em dois fenómenos distintos. Pode ser devida à ação do vento (processo eólico) ou devido à diferença de temperatura entre o ar interior e o ar exterior (processo térmico).

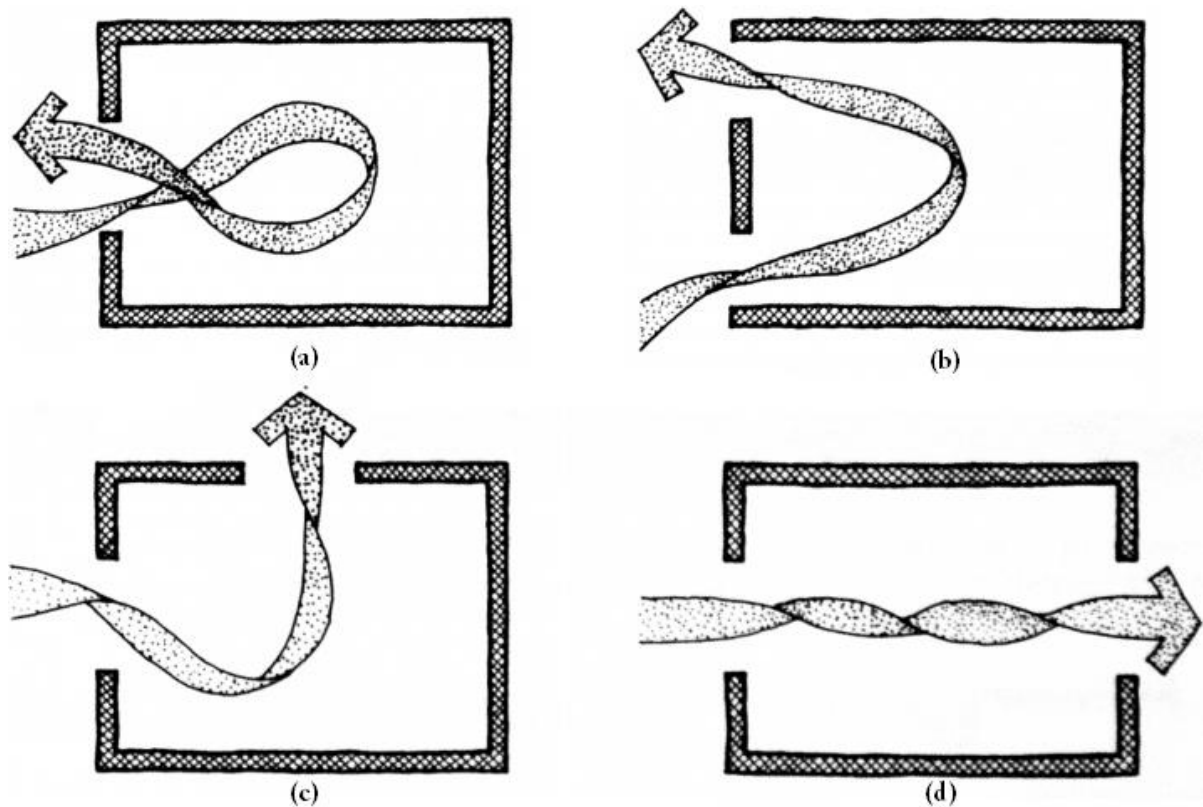


Figura 6 – Tipos de ventilação natural conforme o tipo de abertura, adaptado de [25];

3.1.1. Processo térmico

A diferença de temperaturas entre o ar exterior e o ar interior, ou entre espaços interiores, e a correspondente diferença de densidades, gera diferentes gradientes de pressão hidrostática, levando a um desequilíbrio de pressões que promove os fluxos de ar através das aberturas.

A pressão (P) num ponto a uma dada altura (H) em relação ao solo é dada pela equação 11, na qual o índice 0 corresponde às condições de pressão e temperatura normais [26].

$$P = P_0 - \rho_0 \cdot g \cdot H \quad (11)$$

Onde:

- P_0 é a pressão atmosférica, $1,0325 \times 10^5 \text{ Pa}$;
- ρ_0 é a densidade do ar, $1,2929 \text{ kg/m}^3$
- g é a aceleração da gravidade, $9,8 \text{ m/s}^2$;
- H é altura em relação ao solo, $[m]$;

Como tal, a variação de pressão entre o ar interior (i) e o ar exterior (e) pode ser expressa como:

$$\Delta P = P_{e,0} - P_{i,0} - (\rho_e - \rho_i) \cdot g \cdot H \quad (12)$$

A direção do fluxo de ar, de fora para dentro ou vice-versa, a uma dada altura, depende da posição da abertura em relação ao plano neutro (Figura 7). O plano neutro caracteriza-se como o plano em que a diferença de pressão entre o interior e o exterior é nula ($\Delta P = 0$). Para as aberturas acima deste plano, o fluxo será do interior para o exterior, uma vez que o edifício se encontra em sobrepressão. Se a abertura se encontrar abaixo do plano neutro ocorre o oposto com o ar a ser sugado para o interior.

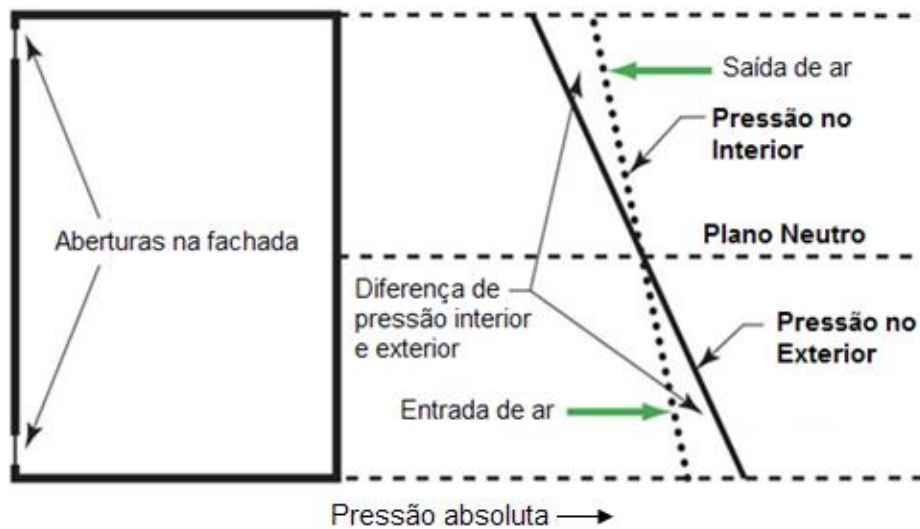


Figura 7 – Distribuição da pressão interior e exterior e localização do plano neutro, adaptado de [27];

À altura do plano neutro (H_0), onde se sabe que a pressão interior é igual à pressão exterior, tem-se:

$$P_{e,0} - P_{i,0} = (\rho_e - \rho_i) \cdot g \cdot H_0 \quad (13)$$

Assumindo como válida a aproximação de *Boussinesq* [28], que estabelece que $\Delta\rho/\rho \approx \Delta T/T$, e considerando que o ar é incompressível, a partir da equação de estado de um gás ideal, $p = \rho \cdot R \cdot T$, a diferença de densidades do ar interior e exterior pode ser dada pela aproximação expressa na equação 14 [29].

$$\frac{\rho_e - \rho_i}{\rho_i} \approx \frac{T_i - T_e}{T_e} \quad (14)$$

Assim, a equação 15 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$P_{e,0} - P_{i,0} = \rho_i \cdot g \cdot H_0 \cdot \frac{T_i - T_e}{T_e} \quad (15)$$

Analogamente, para um ponto com uma altura H_1 , diferente da altura do plano neutro, define-se:

$$\Delta P_{H_1} = P_{e,0} - P_{i,0} - \rho_i \cdot g \cdot H_1 \cdot \frac{T_i - T_e}{T_e} \quad (16)$$

Substituindo a equação 15 na equação 16, obtém-se a pressão em H_1 apenas em função da diferença de temperaturas e da altura da abertura. Obtém-se assim a equação 17.

$$\Delta P_{H_1} = \rho_i \cdot g \cdot (H_0 - H_1) \cdot \frac{T_i - T_e}{T_i} \quad (17)$$

3.1.2. Processo Eólico

Nos casos em que a força motriz da ventilação natural é apenas o vento, o diferencial de pressões na envolvente depende da velocidade e direção do vento. Tal como demonstrado na Figura 8, a incidência sobre o edificado cria uma sobrepressão numa das fachadas, empurrando o ar para o interior do edifício, e uma depressão na fachada oposta, originando uma zona de sucção que força o ar a deslocar-se para o exterior.

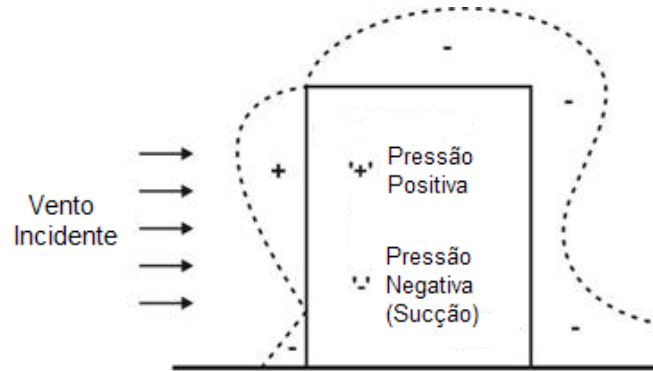


Figura 8 – Distribuição das pressões na envolvente de um edifício em função do vento incidente, adaptado de [30];

A pressão criada pelo vento (P_v) é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade do vento, sendo por isso este o parâmetro mais relevante, e é expressa pela equação 18 [31].

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho_e \cdot U_v^2 \quad (18)$$

Onde:

- C_p é o coeficiente de pressão, que varia com a forma do edifício sobre o qual o vento incide;
- ρ_e é a densidade do ar exterior;
- U_v é a velocidade do vento incidente.

Uma vez que o objetivo é calcular o caudal total, o que é importante saber é a diferença de pressão a montante e a jusante do edifício, ΔP_v , a equação 19 pode ser escrita em função da diferença entre os coeficientes de pressão da abertura de entrada e de saída.

$$\Delta P_v = \frac{1}{2} \cdot \Delta C_p \cdot \rho_e \cdot U_v^2 \quad (19)$$

No caso de existir apenas uma abertura no edifício, a diferença de pressão é expressa pela equação 20 [32].

$$\Delta P_v = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho_e \cdot U_v^2 - P_i \quad (20)$$

À medida que o ar é forçado a entrar no edifício a pressão interior (P_i) aumenta. Quando esta passa a ser superior à pressão induzida pelo vento na abertura, dá-se uma inversão de caudal, passando o ar a ser transportado para o exterior.

3.1.3. Processo combinado

O processo combinado resulta da interação do processo térmico e do processo eólico. O caudal de ventilação resultante é dado pela equação 21, que resulta da aplicação da equação 10 aos dois processos.

$$Q_{vent,total} = \sqrt{Q_{vent,térmico}^2 + Q_{vent,eólico}^2} \quad (21)$$

3.2. Ventilação Mecânica

Em geral, a renovação do ar interior dos edifícios é feita com recursos a sistemas de ventilação mecânica. Estes sistemas são habitualmente compostos por ventiladores de insuflação, que provocam o deslocamento do ar do exterior para o interior, e por ventiladores de extração, que têm a função inversa. A potência elétrica ($P_{ventilação}$) necessária para alimentar um ventilador depende do caudal de ar (\dot{V}) a insuflar (ou a retirar, no caso dos ventiladores de extração), da diferença de pressão (Δp) a montante e a jusante do ventilador e da eficiência mecânica do mesmo (η) e pode ser calculada através da equação 22 [33].

$$P_{ventilação} = \frac{\Delta p \cdot \dot{V}}{\eta} \quad (22)$$

Nos grandes edifícios de serviços, o procedimento mais comum é agrupar os equipamentos de AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) num único sistema, denominado por unidade de tratamento de ar (UTA). Na UTA, o fluido térmico de distribuição de uma bomba de calor transfere calor (ou retira conforme o modo de funcionamento) para ar a introduzir no edifício através de uma bateria de permuta térmica. Estes sistemas permitem a utilização de um recuperador de calor entre as condutas de insuflação e de extração. O objetivo deste sistema é aproveitar ao máximo a energia contida no ar de extração para pré-tratar o ar de insuflação, o que possibilita a redução do consumo de energia associado à climatização.

3.3. Ventilação Híbrida

A ventilação híbrida resulta de uma combinação dos dois tipos de ventilação apresentados anteriormente, natural e mecânica. Normalmente, é dada prioridade à ventilação natural, sendo apenas utilizado o sistema mecânico quando as condições exteriores não são favoráveis, quer a nível de temperatura quer a nível de velocidade do vento.

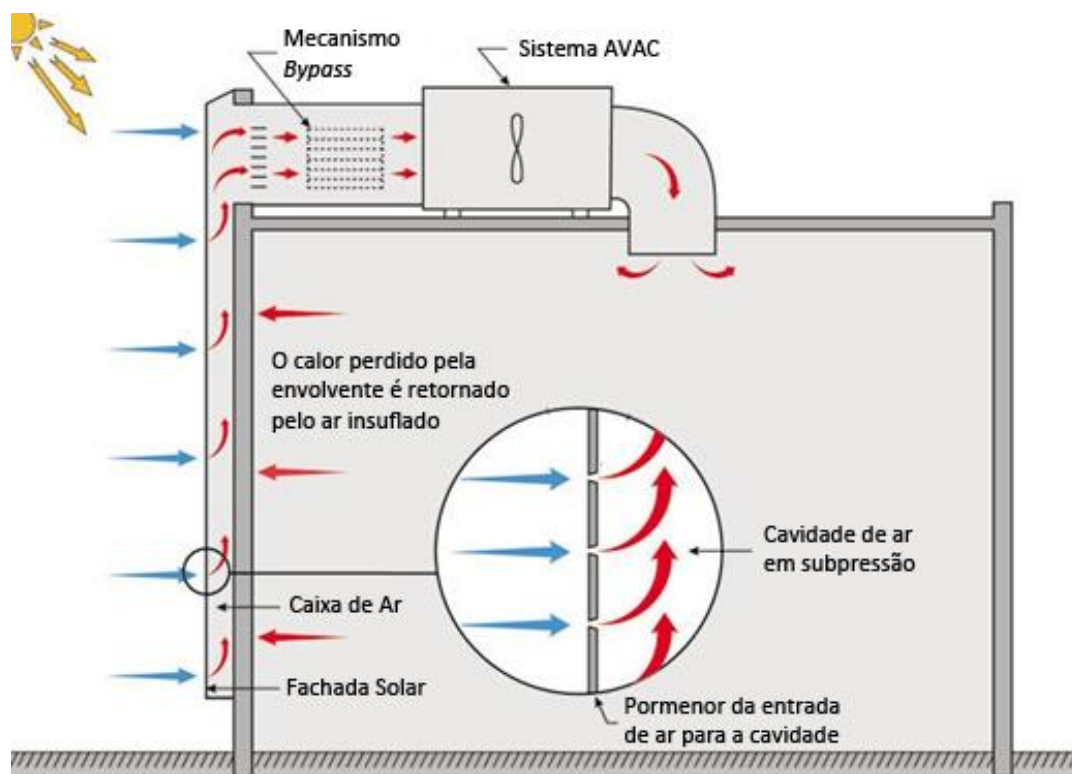


Figura 9 – Exemplo de um sistema híbrido de climatização e ventilação, adaptado de [34];

Na Figura 9 é apresentado um exemplo de um sistema híbrido de ventilação, que aproveita a radiação solar e as perdas de calor pela envolvente para pré-aquecer o ar a insuflar no edifício.

Neste sistema o ar é admitido para uma cavidade existente no exterior do edifício. Por ação da radiação solar incidente na fachada, o ar é aquecido deslocando-se na vertical devido à redução da sua densidade e conduzido para o interior do espaço. No caso do ar ainda não se encontrar nas condições desejadas, é realizado um tratamento adicional por um sistema mecânico. No

verão, quando não é desejável que o ar seja aquecido, existe um sistema *bypass* que permite que o ar apenas circule na cavidade, ajudando a remover algum do calor que é libertado pelo edifício para o interior da cavidade, não sendo posteriormente insuflado no edifício.

4. Descrição do edifício

O ISCTE-IUL é uma instituição pública de ensino universitário localizada na Avenida das Forças Armadas, em Lisboa, e o seu campus é constituído por quatro edifícios. O edifício em estudo, edifício I (Figura 10), foi o primeiro a ser construído, em 1978. Foi construído após a revolução dos cravos de 1974, na Cidade Universitária onde, devido às crises académicas decorridas nos anos sessenta, tinha sido proibida a construção de qualquer edifício com fins académicos por parte do regime. O edifício tem uma área bruta total de 11400 m². De acordo com o definido pelo Decreto-Lei nº118/2013 [35] e aplicando as simplificações previstas no Despacho n.º 15793-E/2013 [36], a área de pavimento interior corresponde a 10260 m². Considerando o carácter de utilização do edifício e a sua área útil, este edifício é considerado um "Grande edifício de comércio e serviços", tal como disposto no mesmo Decreto-Lei.



Figura 10 – Vista aérea do Edifício I, Campus ISCTE-IUL [37];

O edifício é constituído por três pisos, sendo que apenas parte das fachadas sul e oeste se encontram enterradas. Cada um dos pisos está dividido em quatro alas, norte, sul, este e oeste, e quatro prumadas, noroeste, nordeste, sudeste e sudoeste (Figura 11), e engloba espaços com várias tipologias. Entre eles existem dois bares no piso 0, uma sala de estudo no piso 1, salas de aula na ala este e auditórios nas prumadas NE e NW. A restante área é ocupada essencialmente por gabinetes e secretariado.

No edifício a energia consumida é proveniente de duas fontes, energia elétrica, fornecida pela IBERDROLA e gás natural, fornecido pela GALP. O gás natural consumido é utilizado exclusivamente para climatização.

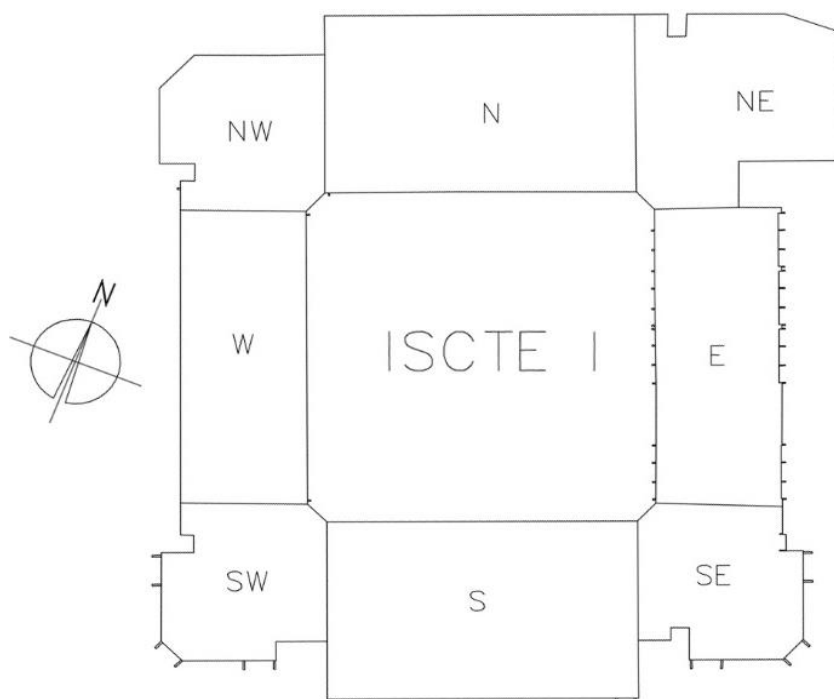


Figura 11 – Esquema de divisão do edifício I

4.1. Tipologia e Ocupação de Espaços

Uma das características que distingue o edifício I dos restantes é o seu prolongado período de utilização, visto que dispõe de dois espaços de estudo, nos pisos 0 e 1 da Ala Norte, que estão abertos 24 horas durante todo o ano.

Na Tabela 2 observa-se a distribuição da área do edifício por tipologia dos espaços, o edifício é maioritariamente composto por espaços de serviços, o que vai originar consumos mais elevados do que aqueles que eram espectáveis à partida, uma vez que a densidade de equipamentos (computadores e impressoras) nestes espaços é superior à existente, por exemplo, nas salas de aula.

Tabela 2 - Área correspondente a cada tipologia

Tipologia	Área	
	[m ²]	%
Gabinetes e Secretariado	3409	33
Zonas de Circulação	2369	23
Auditórios	1237	12
Salas de Aula	856	8
Salas de Refeições	629	6
Comércio	623	6
Salas de Estudo	469	5
Zonas Técnica	290	3
Lab. de Informática	190	2
Instalações Sanitárias	177	2

Para analisar os períodos de funcionamento do edifício com o maior rigor possível foi necessário definir calendários de ocupação para os diferentes espaços. Para tal recorreu-se à informação disponível no portal do campus [38] de modo a perceber qual o perfil de ocupação dos diferentes espaços durante o ano, conforme a sua tipologia. Como base de comparação foi utilizado o ano civil de 2013, que abrange os anos letivos de 2012/13 e 2013/14. Na Tabela 3 é apresentado o calendário anual do campus ISCTE-IUL.

Tabela 3 - Calendário referente ao ano civil de 2013

	Início	Fim
Período de avaliações do 1º semestre (ano letivo 2012/13)	7/Jan	1/Fev
Aulas do 2º semestre (ano letivo 2012/13)	4/Fev	1/Jun
Interrupção de aulas (Carnaval)	11/Fev	15/Fev
Interrupção de aulas (Páscoa)	25/Mar	7/Abr
Período de avaliações do 2º semestre (ano letivo 2012/13)	3/Jun	28/Jun
Período Especial de avaliações (ano letivo 2012/13)	15/Jul	19/Jul
Interrupção de aulas (Verão)	20/Jul	15/Set
Fecho do ISCTE	29/Jul	11/Ago
Aulas do 1º semestre (ano letivo 2013/14)	16/Set	20/Dez
Interrupção de aulas (Natal)	23/Dez	31/Dez

Para além do calendário anual foi também necessário definir o perfil diário de ocupação para as diferentes tipologias de espaço. Com base no portal do campus, estabeleceu-se que, durante o período letivo, as salas de aula e os laboratórios de informática funcionam durante os dias de semana, das 8h às 22h, e aos sábados de manhã, das 8h às 13h, e que durante as épocas de exames existe uma ocupação pontual de alunos que as requisitam para estudar. Durante as férias letivas foi considerado que não existia ocupação. Os auditórios mais antigos, piso 1 e 2 da prumada NW e piso 2 da prumada NE, têm um funcionamento idêntico ao das salas de aula, no entanto, durante as épocas de exames estes são ocupados durante nove horas, três blocos de três horas, com avaliações e exames durante os dias úteis. Os auditórios que foram renovados em 2014, piso 0 e 1 da prumada NE, apenas têm uma utilização pontual, e como tal foi considerado que existia um evento por semana e que o mesmo decorria entre as 9h e as 19h. No caso dos gabinetes, salas de investigação e secretariado, foi considerado o horário de expediente mais comum, das 8h às 18h para os dias úteis. Para os espaços comerciais, como por exemplo as reprografias e os bares, assumiu-se um horário de funcionamento para os dias úteis das 8h às 20h, estando fechados nos restantes dias. Os espaços de estudo funcionam durante todo dia, no entanto foi considerada uma taxa de ocupação mais elevada nos períodos de exames e avaliação do que no resto do ano.

4.2. Soluções Construtivas

Tendo em conta a antiguidade do edifício, foi difícil ter acesso às informações originais sobre as soluções construtivas. Assim a informação foi recolhida com base na memória descritiva da obra de reabilitação das coberturas do edifício, realizada em 1993, e nos dados disponibilizados pela

Unidade de Serviços e recursos do ISCTE-IUL. A construção do edifício é composta essencialmente de betão.

4.2.1. Envolvente Opaca

A envolvente vertical exterior é essencialmente constituída por painéis de betão e apenas a cobertura possui isolamento térmico e impermeabilizante. Os vãos envidraçados da ala poente e sul são distintos dos da ala nascente e norte. Na ala poente e sul, os vãos envidraçados são de vidro duplo e caixilharia de alumínio com rutura de ponte térmica. Na ala norte e nascente, os vãos envidraçados são de vidro simples e caixilharia de alumínio.

- Envolvente exterior vertical opaca:

As paredes exteriores são constituídas, do interior para o exterior, por reboco pintado, com 0.01 m de espessura, 2000 kg/m³ de densidade e uma condutibilidade térmica de 1.55 W/(m°C), e por painéis de betão, com 0.3m de espessura, 2300 kg/m³ de densidade e uma condutibilidade térmica de 1.825 W/(m°C).

- Envolvente interior vertical:

As paredes interiores são constituídas por reboco pintado, com 0.01m de espessura, 2000 kg/m³ de densidade e uma condutibilidade térmica de 1.55 W/(m°C), por blocos de betão celular, com 0.1 m de espessura, 750 kg/m³ de densidade e uma condutibilidade térmica de 0.27 W/(m°C), e outra camada de reboco com características iguais às mencionadas anteriormente.

- Envolvente exterior horizontal opaca:

Existem dois tipos de cobertura exterior, uma sombreada, sobre a zona corrente e outra não sombreada, sobre a zona não corrente (Figura 12).

Em zona corrente a cobertura é constituída do interior para o exterior, por cortiça com densidade de 400 kg/m³, espessura de 0.04 m e condutibilidade térmica de 0.065 W/(m°C), uma laje de betão armado com 2300 kg/m³ de densidade, espessura de 0.14 m e condutibilidade térmica de 2 W/(m°C) uma membrana impermeabilizante de *polyester* com densidade de 1300 kg/m³, espessura 0.003m e condutibilidade 0.235 W/(m°C), uma placa de poliestireno extrudido com densidade 35 kg/m³, 0.03 m de espessura e condutibilidade 0.035 W/(m°C), uma película de estabilização de geotêxtil com densidade de 105 kg/m³, espessura de 0.001m e condutibilidade de 0.22 W/(m°C). O revestimento é feito em betonilha esquartelada com 0.014 m de espessura, densidade de 1800 kg/m³ e condutibilidade de 1.35 W/(m°C), sendo o sombreamento exterior em telhas de fibrocimento com uma densidade 1800 kg/m³, espessura de 0.008 m e condutibilidade 0.65 W/(m°C). Entre estes dois revestimentos existe um espaço de ar com uma espessura média de 0.3 m, no entanto este é desprezável no cálculo do coeficiente de transmissão térmica da cobertura visto que é um espaço de ar fortemente ventilado [39].

Em zona não corrente, é constituída do interior para o exterior, por cortiça com densidade de 400 kg/m^3 , espessura de 0.04 m e condutibilidade térmica de $0.065 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$, uma laje de betão armado com 2300 kg/m^3 de densidade, espessura de 0.14 m e condutibilidade térmica de $2 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$ duas membranas impermeabilizantes de *polyester* com densidade de 1300 kg/m^3 , espessura total de 0.005 m e condutibilidade $0.235 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$, uma placa de poliestireno extrudido com densidade 35 kg/m^3 , 0.05 m de espessura e condutibilidade $0.035 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$, uma película de estabilização de Geotextil com densidade de 105 kg/m^3 , espessura de 0.001 m e condutibilidade de $0.22 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$. O revestimento é de mosaico hidráulico com 0.025 m , com uma densidade de 2300 kg/m^3 e condutibilidade de $1.3 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$.

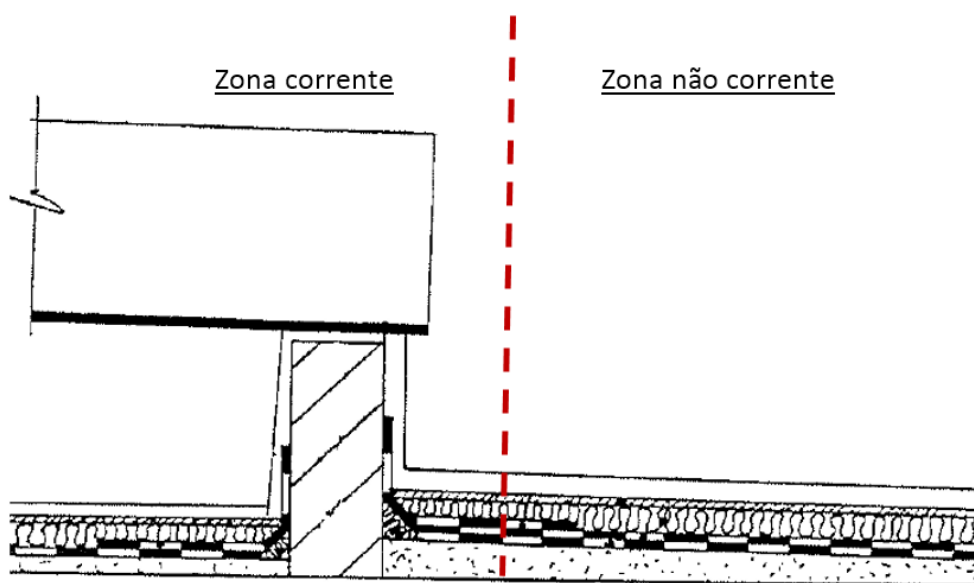


Figura 12 – Pormenor da envolvente exterior horizontal;

- Pavimento Térreo:

O pavimento sobre o solo é constituído, do interior para o exterior, por uma camada superficial de linóleo com 0.01 m de espessura, uma densidade de 1200 kg/m^3 e condutibilidade de $0.17 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$, seguido de uma laje de betão com 0.2 m de espessura, densidade de 2300 kg/m^3 e condutibilidade térmica de $2 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$.

- Pavimento Interior:

A laje entre pisos é constituída, de baixo para cima, por uma camada de cortiça de 0.04 m de espessura, densidade de 400 kg/m^3 e condutibilidade térmica de $0.065 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$, uma laje de betão com 0.14 m de espessura, densidade de 2300 kg/m^3 e condutibilidade térmica de $2 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$. O revestimento superior é de linóleo com 0.01 m de espessura, uma densidade de 1200 kg/m^3 e condutibilidade de $0.17 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$.

4.2.2. Vão Envidraçados

Originalmente, os vãos envidraçados do edifício eram constituídos por vidro simples, com 6 mm de espessura, no entanto, nos pisos 1 e 2 das alas sul e oeste e nos gabinetes dos átrios sudeste e sudoeste, os envidraçados foram substituídos nos últimos anos. A solução escolhida para a substituição foram janelas de vidro duplo com caixilho em alumínio com corte térmico. Para além da substituição das janelas, foi colocada uma película refletora de proteção solar (Anexo I), nas salas do piso 1 e 2 orientadas a poente, o que permite minimizar os ganhos solares nos diferentes espaços.

O sombreamento dos vãos é feito com recurso a estores exteriores de plástico, que são acionados pelos ocupantes. Para além dos estores exteriores existem ainda palas de betão armado (Figura 13), laterais e horizontais, com cerca de 0.65 m de profundidade.



Figura 13 – Exemplo dos vãos envidraçados com vidro simples e do sombreamento, Piso 1 - Ala Norte;

Existem duas dimensões de janela, sendo que entre elas apenas difere a área das folhas fixas. Cada vão envidraçado é constituído por três folhas oscilo batentes, que totalizam 1.95 m² de área de vidro, e três folhas fixas. As janelas grandes têm 2.34 m² de área de vidro da folha fixa e as pequenas 1.84 m². Por cada janela grande existente existem duas pequenas.

Na Tabela 4 e

Tabela 5 é apresentado um resumo das características da envolvente opaca e dos vãos envidraçados. No cálculo dos valores de condutividade apresentados foram considerados os valores de resistência superficial, consoante o sentido e direção do fluxo de calor.

Tabela 4 - Constituição dos diferentes elementos construtivos e respetivos coeficientes de transmissão térmica

	Material	Espessura [m]	Condutividade [W/(m.K)]	Coeficiente de transmissão térmica [W/(m².K)]
Paredes Exteriores	Painel Pré-fabricado de Betão	0.300	1.825	2.93
	Reboco	0.010	1.55	
Paredes Interiores	Reboco	0.010	1.55	1.54
	Bloco de betão poroso	0.100	0.27	
	Reboco	0.015	1.15	
Pavimento/Cobertura Interior	Linóleo	0.010	0.17	1.12
	Laje de Betão	0.140	1.85	
	Cortiça	0.040	0.065	
Pavimento Exterior	Linóleo	0.010	0.17	2.65
	Laje de Betão	0.200	1.85	
Cobertura Exterior em zona corrente	Cortiça	0.040	0.065	0.58
	Laje de betão	0.140	2	
	Membrana Polyester R40	0.003	0.235	
	Poliestireno extrudido SL30	0.030	0.035	
	Geotextil	0.001	0.22	
	Betonilha	0.014	1.35	
	Canaletes	0.008	0.65	
Cobertura Exterior em zona não corrente	Cortiça	0.040	0.065	0.44
	Laje de betão	0.140	2	
	Membrana Polyplas 30	0.002	0.235	
	Membrana Polyester R40	0.003	0.235	
	Poliestireno extrudido SL50	0.050	0.035	
	Geotextil	0.001	0.22	
	Mosaico hidráulico	0.025	1.3	

Tabela 5 – Condutividade e factor solar dos diferentes tipos de vãos envidraçados

	Espessura [mm]			Coeficiente de transmissão térmica [W/(m².°C)]	Factor Solar
	Vidro Exterior	Caixa de Ar	Vidro Interior		
Vidro Duplo	6	12	8	1.6	0.33
Vidro Duplo com Película Exterior	6	12	8	2.9	0.14
Vidro Simples	6	-	-	5.7	0.85
Vidro Simples com Película Exterior	6	-	-	5.8	0.18

4.3. Sistemas de Climatização e Ventilação

Devido à dimensão do edifício e pela vasta diversidade de tipos utilização, não existe nenhum sistema centralizado de climatização. Assim, a climatização do edifício é assegurada por sistemas independentes que são afetos a zonas com a mesma tipologia e perfil de ocupação. Nos pontos seguintes são apresentados os diversos equipamentos existentes e as suas características mais importantes, como o *COP (Coefficient Of Performance)* e o *EER (Energy Efficiency Ratio)*, que definem a eficiência de conversão de energia elétrica em energia térmica, e a capacidade máxima, tanto de aquecimento como de arrefecimento.

4.3.1. Radiadores

Os radiadores existentes em todo o edifício (Figura 14) são abastecidos de água quente por uma caldeira, instalada em 2003, com uma capacidade térmica de 800 kW e um rendimento de 93%. Não existe qualquer informação referente ao sistema de distribuição de água quente devido à antiguidade. O rendimento global do sistema, produção e distribuição, é influenciado por diversos parâmetros, entre eles a localização da caldeira, a temperatura de operação, a existência ou não de isolamento nos tubos de distribuição e a diferença de temperatura da água à saída e no ponto de retorno [40]. Para o sistema do edifício em estudo, considerou-se que a produção de água quente é feita fora dos espaços a aquecer, o isolamento é ineficiente, a temperatura de operação é de 90°C e um decréscimo de temperatura superior a 10°C. Tendo em conta os pressupostos assumidos e de acordo com a Tabela 6, obteve-se um rendimento total do sistema de 67%.

Tabela 6 - Fatores a considerar no cálculo da eficiência do sistema, adaptado de [40];

Critério		Factor
Localização do Equipamento	Interior do espaço climatizado	1
	Exterior do espaço climatizado	0.9
Isolamento da distribuição	Sem Isolamento	0.7
	Isolamento não ideal	0.9
	Isolamento ideal	1
Temperatura de operação	Baixa (<35°C)	1
	Média (<50°C)	0.95
	Alta (>50°C)	0.9
Decréscimo de Temperatura (entre a ida e o retorno)	Baixa (<5°C)	0.98
	Média (<10°C)	0.99
	Alta (>10°C)	1

A caldeira apenas se encontra em funcionamento entre Novembro e Abril, período que corresponde à estação de aquecimento.



Figura 14 – Exemplo dos radiadores existentes no edifício;

4.3.2. Auditórios da Prumada Nordeste

O sistema de climatização que serve os auditórios da prumada nordeste foi instalado durante a obra de reabilitação dos mesmos, realizada em 2012. Os auditórios laterais do piso 0 são servidos ambos pela mesma unidade de tratamento de ar novo (UTAN), no entanto, o auditório do piso 1 e o auditório central do piso 0 têm UTAN's dedicadas. A climatização dos espaços é efetuada com recurso a um grupo térmico integral (GTI) a 4 tubos (Figura 15), que permite a produção de calor e frio em simultâneo. Existem também dois depósitos de inércia, um para quente e outro para frio, que permitem reduzir os consumos do GTI, uma vez que ajudam a satisfazer as necessidades de calor e frio durante o arranque do equipamento, precisamente quando este consome mais energia.

Tabela 7 - Especificações técnicas dos equipamentos afetos aos auditórios

Tipo de Equipamento	Referência	Potências Térmicas [kW]		ERR	COP	Espaços Afetos	Caudal de ar novo [m3/h]
		Arrefecimento	Aquecimento				
GTI	NECS-Q /B 0604	149.8	169	2.5	2.9	Auditórios Prumada NE	-
UTA	SYSTEMAIR TOPVEX TR06	-				Auditório Central Piso 0	1880
UTA	SANDOMETAL eSDM 1/3	-				Auditórios Laterais Piso 0	3590
UTA	SANDOMETAL eSDM 2/3	-				Auditório Piso 1	8490



Figura 15 - Grupo térmico integral localizado na cobertura e que serve os auditórios;

4.3.3. Reitoria

A reitoria é climatizada através de quatro sistemas independentes. O sistema afeto aos gabinetes e corredor a norte é constituído por uma unidade com controlo de caudal variável de fluido frigorigéneo (VRV) e um unidade de ar novo e extração (UANE) com recuperação de calor (Figura 16). O sistema que serve os gabinetes e corredor a sul é idêntico ao sistema do lado norte, no entanto a UANE é diferente, tendo uma maior capacidade. O auditório da reitoria (Sala Actos) tem um sistema dedicado que é constituído por uma unidade *Rooftop*, que climatiza e trata do ar insuflado. Os gabinetes localizados no átrio II da reitoria são climatizados com recurso a uma unidade VRV sendo a ventilação assegurada por uma unidade de ar novo exterior.

Tabela 8 - Especificações técnicas dos equipamentos afetos à reitoria

Tipo de Equipamento	Referência	Potências Térmicas [kW]		ERR	COP	Espaços Afetos	Caudal de ar novo [m3/h]
		Arrefecimento	Aquecimento				
Unidade VRV	TOSHIBA MMY MAP1001HT8	28	31.5	3.2	3.6	Ala Norte	-
Unidade VRV	TOSHIBA MMY MAP1001HT8	28	31.5	3.2	3.6	Ala Sul	-
Unidade VRV	Mitsubishi PUHY-P300YJM	33.5	37.5	3.7	4.1	Gabinetes Átrio II	-
Unidade Rooftop	WESPER AHN 254	24.6	24.9	3.6	4.1	Sala Actos	4290
UANE	TOSHIBA VN 800SE	-				Ala Norte	900
UANE	VENTILCLIMA EBF05	-				Ala Sul	2500
UANE	Mitsubishi LGH-100RX5-E	-				Gabinetes Átrio II	810



Figura 16 – Unidades VRV que servem os gabinetes e corredores da reitoria;

4.3.4. Clínica

A clinica, localizada na ala E do piso 0, está dividida em duas zonas. A parafarmácia, com cerca de 30 m², servida por uma unidade de tratamento de ar novo (UTAN) e uma unidade VRV, e a zona de consultórios, com 166 m² de área, climatizada por duas unidades VRV e uma UTAN igual à que serve a parafarmácia.

Tabela 9 - Especificações técnicas dos equipamentos afetos à Clínica

Tipo de Equipamento	Referência	Potências Térmicas [kW]		ERR	COP	Espaços Afetos	Caudal de ar novo [m3/h]
		Arrefecimento	Aquecimento				
Unidade VRV	TOSHIBA MCY MAP0501HT8	14	16	4.0	4.0	Consultórios e Recepção	-
Unidade VRV	TOSHIBA MCY MAP0401HT8	12.1	12.5	4.3	4.6	Consultórios e Recepção	-
Unidade VRV	TOSHIBA MCY MAP0401HT8	12.1	12.5	4.3	4.6	Parafarmácia	-
UTAN	-	-				Consultórios e Recepção	1000
UTAN	-	-				Parafarmácia	1000



Figura 17 – Unidades VRV que servem os consultórios e a recepção;

4.3.5. Serviços Acadêmicos

Os serviços acadêmicos apenas dispõem de uma unidade do tipo *split* que apenas produz frio, não existindo qualquer sistema que faça a renovação do ar do espaço. Tendo em conta a elevada densidade de ocupação e a exposição solar a sala, orientada a sul, a necessidade de aquecer o espaço ocorre apenas esporadicamente. Nos casos em que essa necessidade existe, são utilizados os radiadores descritos anteriormente para se proceder ao aquecimento da sala.

Tabela 10 – Especificações técnicas do equipamento existente nos Serviços Acadêmicos

Tipo de Equipamento	Referência	Potências Térmicas [kW]		ERR	COP	Espaços Afetos
		Arrefecimento	Aquecimento			
Unidade Split	Mitsubishi PU-P125YHA	12.5	-	2.9	-	Serviços Acadêmicos

4.3.6. Centro de Dados

O centro de dados é constituído por diversos servidores que, quando se encontram em funcionamento, libertam uma elevada quantidade de calor para o espaço. Para garantir que os servidores funcionem normalmente é necessário retirar esse calor do espaço. Neste caso, o calor é retirado recorrendo a duas unidades do tipo *split* iguais, cada uma delas com capacidade para retirar cerca de 75% da carga térmica máxima prevista, ficando a restante capacidade de reserva para um eventual pico.

Tabela 11 – Especificações técnicas dos equipamentos existentes no Centro de Dados

Tipo de Equipamento	Referência	Potências Térmicas [kW]		ERR	COP	Espaços Afetos
		Arrefecimento	Aquecimento			
Unidade Split	Mitsubishi MUZ-GB50VA	5	5.8	3.0	3.4	Centro de Dados

4.3.7. Unidades *Split*

Para além dos equipamentos descritos acima existem ainda diversos equipamentos do tipo split, conjunto de duas unidades, uma no interior e outra no exterior, distribuídas pelo edifício. Devido ao elevado número de equipamentos deste tipo, cerca de 60 unidades ao todo, e tendo em conta que fazer um levantamento exaustivo das especificações técnicas das mesmas seria um processo bastante moroso, considerou-se que o COP (ou EER consoante o modo de operação) é o mesmo para todos os equipamentos. Os valores considerados são aqueles que estão presentes na regulamentação portuguesa [3] como requisitos mínimos de eficiência das unidades de produção térmica. No caso das unidades compactas do tipo *split* são 4.1 e 3.8 para o COP e EER, respetivamente.

4.4. Iluminação

Nesta secção será descrito o sistema de iluminação do edifício. De forma a abranger todos os espaços e tipos de iluminação foi realizado um levantamento *in situ* de todos os equipamentos de iluminação instalados, onde foi registado o tipo e a quantidade de lâmpadas e luminárias. Os perfis horários de funcionamento do equipamento dependem da tipologia do espaço em que se encontram. Assim, os horários de utilização considerados são idênticos aos horários de ocupação, com exceção dos espaços de circulação e as instalações sanitárias, nos quais as luzes se encontram ligadas mesmo em períodos em que não existe ocupação.

Como se pode verificar na Figura 18, a tecnologia dominante no edifício são as lâmpadas fluorescentes tubulares do tipo T8. A segunda tecnologia mais presente são as fluorescentes tubulares do tipo T5, uma vez que este foi o tipo lâmpadas escolhido na renovação do sistema de iluminação da ala W, piso 1 e 2. A presença de lâmpadas de halógeno no edifício é residual, existindo apenas nos serviços académicos e na reitoria. A iluminação nas casas de banho tem vindo a ser gradualmente substituída por tecnologia LED.

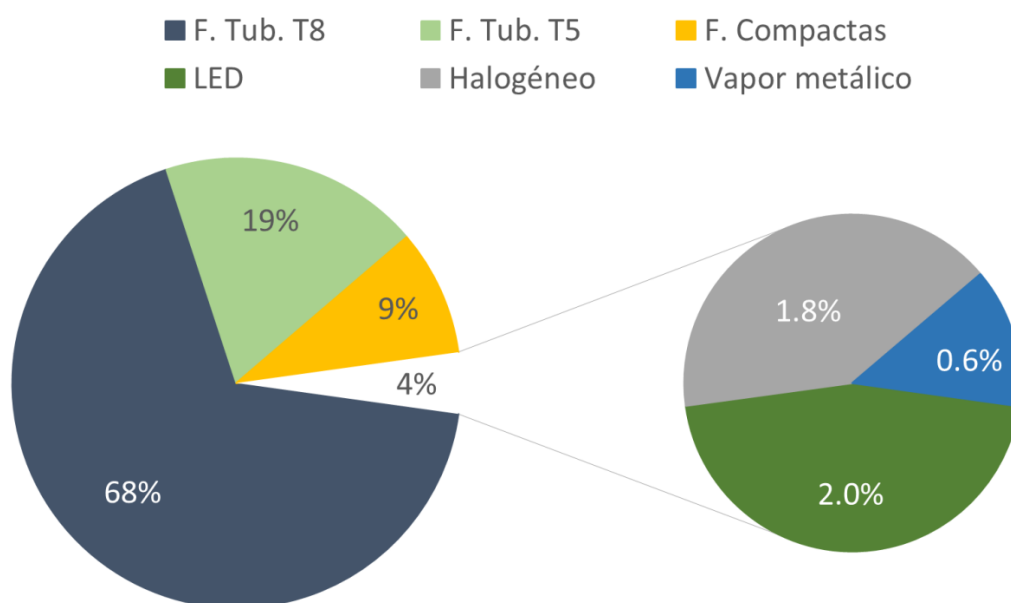


Figura 18 - Distribuição da área iluminada pelos diferentes tipos de tecnologia;

Como era expectável, os espaços que apresentam uma maior densidade de potência são os espaços de trabalho, como por exemplo os gabinetes e as salas de aula. No entanto é de realçar que o facto de ter uma densidade de potência mais elevada não significa que o consumo de energia seja mais elevado. Por exemplo, no caso de alguns dos auditórios, existe uma grande variedade de lâmpadas instaladas e vários perfis de funcionamento, que podem ser combinados conforme a utilização dada à sala (congresso, aula, exame, etc.), no entanto é pouco provável que estas se encontrem todas ligadas em simultâneo.

Os valores apresentados na Tabela 12 já incluem um incremento de 20% da potência das lâmpadas instaladas devido à existência de balastros ferromagnéticos [41]. Os tipos de lâmpadas que necessitam do auxílio de um balastro para o seu funcionamento são as lâmpadas do tipo fluorescente tubular T8, e algumas lâmpadas do tipo fluorescente compacta. Estas lâmpadas necessitam de uma tensão elevada durante o arranque para efetuar a descarga do gás que existe no seu interior. A limitação da corrente por parte do balastro dá origem a um aumento de tensão necessário para que possa acontecer essa descarga.

Tabela 12 – Densidade de potência instalada por tipologia de espaço

Tipologia	DPI [W/m ²]	Tipologia	DPI [W/m ²]
Auditórios	25	Zonas de Circulação	13
Sala de Aula	23	Sala de Refeições	12
Gabinetes e Secretariado	20	Comércio	10
Sala de Estudo	18	Instalações Sanitárias	9
Laboratórios de Informática	15	Zona Técnica	8

5. Certificação Energética do Edifício

O primeiro passo para a certificação energética de uma grande edifício de serviços existente passa por construir um modelo geométrico representativo do edifício em análise. Seguidamente devem ser analisados os equipamentos existentes no edifício e o perfil de ocupação do mesmo. Antes de se proceder ao cálculo da classe energética deve ser realizada uma calibração do modelo do edifício, por comparação com medições reais ou faturas energéticas e de modo a garantir que os resultados obtidos são coerentes com aquilo que é verificado na realidade.

5.1. Modelo geométrico e zonamento térmico

Para construção do modelo geométrico (Figura 19) é necessário ter em atenção os edifícios e obstáculos existentes na envolvente do edifício, como por exemplo árvores, de modo a não desprezar os efeitos de sombreamento causados por estes.

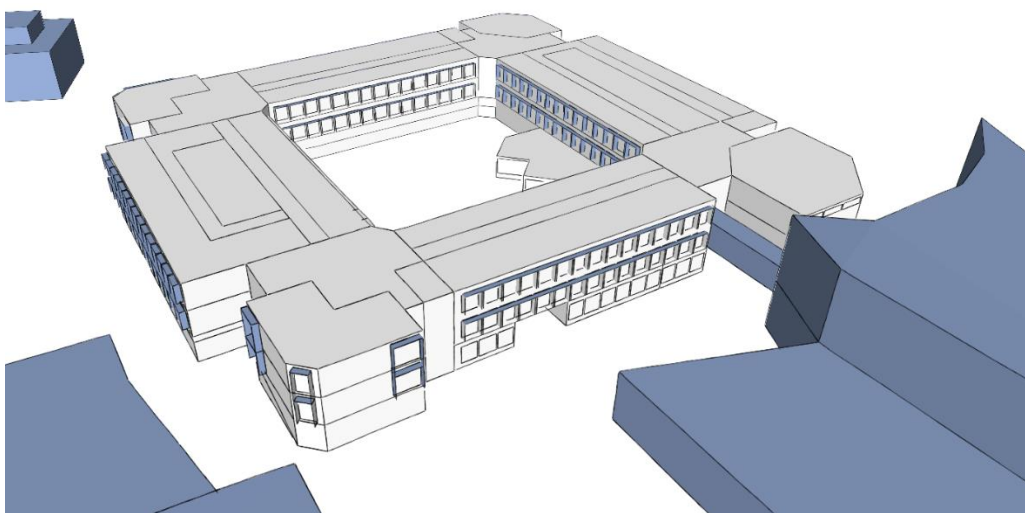


Figura 19 - Modelo geométrico do edifício e edifícios envolventes, vista sudeste;

Tal como referido anteriormente a divisão do edifício em zonas térmicas é feita em simultâneo com a construção do modelo. O zonamento consiste no agrupamento de espaços do edifício por zonas que se podem considerar semelhantes em termos de propriedades termodinâmicas (temperatura, humidade, etc.) e que tenham uma tipologia semelhante. A necessidade de agrupar numa só zona vários espaços idênticos prende-se com a questão do tempo de simulação, uma vez que quanto maior for o número de zonas mais pesada e morosa se torna a simulação. Durante o levantamento realizado para a recolha de informação referente ao sistema de iluminação, foram também registadas informações importantes na definição das zonas térmicas. Os parâmetros mais importantes a considerar para o zonamento são:

- Orientação;
- Configuração dos envidraçados e sombreamento dos mesmos;
- Sistemas de climatização afetos;

- Tipologia e perfil de utilização;
- Cargas internas, tanto de equipamentos como de ocupantes.

No caso das salas de aula, localizadas no piso 1 e 2 da ala este foram agrupadas na mesma zona térmica as salas que tenham a mesma orientação, tal como exemplificado na Figura 20. Em cada piso ficaram então definidas três zonas térmicas, uma correspondente ao corredor, uma para as salas de aula orientadas a este e por último uma para as salas de aulas orientadas a oeste.

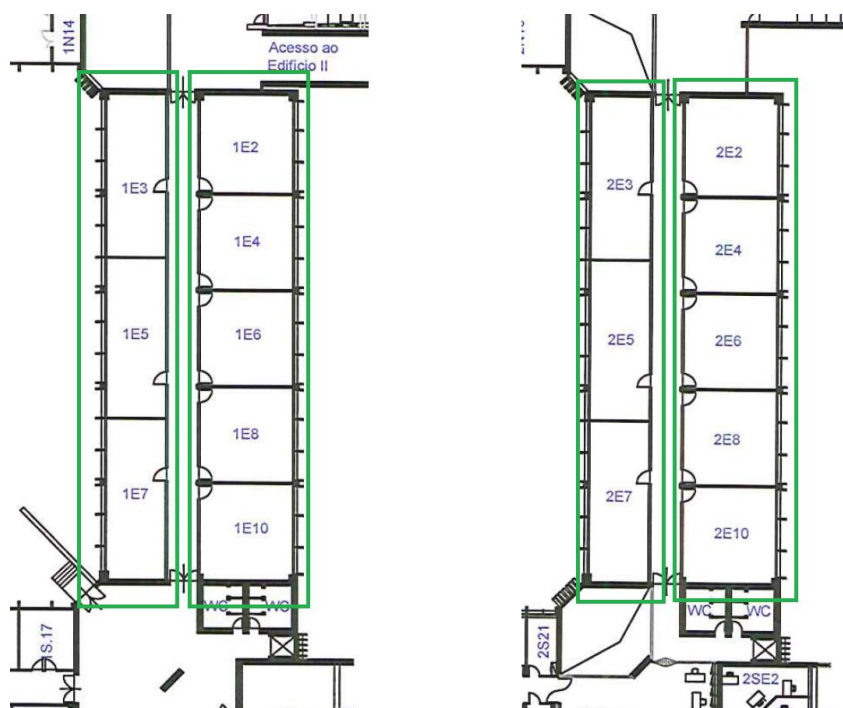


Figura 20 – Exemplo do zonamento correspondente às salas de aula;

5.2. Cargas Internas

No interior do edifício existem diversos objetos geradores de calor. A sua modelação é de extrema importância na medida em que estes contribuem significativamente para o balanço térmico dos espaços em que se encontram inseridos. Nas próximas secções é descrito o procedimento realizado na contabilização dos diferentes ganhos internos.

5.2.1. Ocupantes

No que diz respeito aos ocupantes, foi considerado que estes têm um metabolismo de 1.0 met, correspondente ao tipo de atividade sedentária de escritório (ler e escrever). Uma unidade de taxa de metabolismo dos ocupantes [met] é equivalente a 58.15 W/m² e, para um adulto típico,

a área de superfície exterior corporal é 1.8 m² [42], assim os ganhos internos por ocupante são aproximadamente 105 W.

5.2.2. Equipamento

Existem no edifício em estudo diversos contadores internos que não se encontram ligados à rede, e que têm como objetivo contabilizar os consumos dos diferentes espaços concessionados. Através das contagens internas realizadas pelo ISCTE é possível saber o consumo que resulta de diversos equipamentos, como por exemplo as máquinas de venda automática existentes nas zonas de circulação e as máquinas fotocopadoras da reprografia. No entanto existem vários equipamentos que são utilizados intensivamente mas que não têm nenhum contador associados, como é o caso dos computadores presentes nos gabinetes. De modo a estimar os consumos associados aos restantes equipamentos foram feitas algumas considerações quanto à utilização dos mesmos nos diferentes espaços. No caso dos computadores é necessário diferenciar o consumo entre computadores de secretária e computadores portáteis [43].

Para os elevadores, o valor considerado corresponde ao valor típico de 1.1 kWh/pessoa [44], sendo que no edifício em análise o elevador existente tem capacidade para 4 pessoas. Na restauração, os valores encontrados na bibliografia referentes ao consumo por refeição preparada [45] [46], variam entre os 0.8 e os 3.1 kWh/refeição. Atendendo ao tipo estabelecimento em questão, foi considerado o valor mais pequeno, uma vez que a oferta em ambos bares se baseia essencialmente em refeições leves.

Existem ainda no edifício espaços de livre acesso com micro-ondas. Como valor de referência para a estimativa de consumo destes equipamentos foi considerado o valor tabelado pela ASHRAE [43].

Tabela 13 – Pressupostos assumidos em relação aos equipamentos existente no edifício

Equipamento		Potência/Consumo	
Computador	Secretária (torre + ecrã)	69+38	W
	Portátil	23	W
Projetor		300	W
Micro-ondas		600	W
Elevador (4 pessoas)		4.4	kW
Refeição		0.8	kWh

Quanto à distribuição dos computadores considerou-se que nos gabinetes, cada ocupante tem um computador. Nas salas de aula e auditórios assumiu-se que apenas existe o computador do docente, e que todas aulas são lecionadas com recurso a um projetor. Assumiu-se ainda que os elevadores funcionam durante uma hora nos dias de semana.

Os perfis de funcionamento dos equipamentos são idênticos aos perfis de funcionamento dos espaços onde se encontram.

5.3. Infiltração de ar exterior e condições fronteira

Os espaços interiores do edifício estão sujeitos a infiltração de ar exterior, que varia consoante a envolvente e a diferença de pressões entre o interior e o exterior. O valor considerado como caudal de infiltração foi de 1 renovação por hora, no entanto este valor só se aplica nos casos em que os sistemas de ventilação estão desligados ou são inexistentes. Ao insuflar ar para o interior de um espaço este fica em sobrepressão, e como tal pode considerar-se que o efeito de infiltração é anulado. Nos espaços em que estão durante largos períodos em contacto com o exterior, como por exemplo corredores e átrios, considerou uma taxa de infiltração de 2 renovações por hora.

As condições fronteira de uma dada superfície têm um papel bastante relevante pois são estas que determinam a quantidade de calor que é transferida através da envolvente de uma zona térmica. As superfícies em contacto com o exterior estão sujeitas ao clima definido no ficheiro climático e não existe uma abordagem alternativa para a definição das suas condições fronteira. No caso das superfícies que se encontram em contacto com o solo considerou-se uma abordagem diferente daquela que é habitual. O método utilizado consiste na definição de uma construção formada pelos materiais que a constituem o pavimento do edifício, mais 30 cm de enrocamento e posteriormente uma camada de solo com uma espessura tal que a espessura total desta construção perfaça os 2 metros [11]. A temperatura do solo é obtida a partir do ficheiro climático utilizado, está definida para várias profundidades (0, 2 e 4 metros) e é de definida no *EnergyPlus* através do objeto *Site:GroundTemperature:BuildingSurfaces*.

5.4. Climatização

A modelação dos ocupantes, equipamentos e sistemas de iluminação no *EnergyPlus* não permite uma grande variedade de abordagens. Para os três casos é possível definir densidades de ocupação no espaço e calendários de atividade, quer a nível horário quer a nível semanal. No entanto a modelação dos sistemas de climatização pode ser feita de diversas formas, desde modelar todos os componentes de um sistema de climatização e ventilação (bomba de calor, UTA, bombas de circulação, etc.), a considerar apenas um objeto equivalente com as características dos vários equipamentos.

Uma vez que o resultado pretendido é o valor do consumo energético anual do edifício, o acréscimo de precisão obtido ao modelar todos os equipamentos não é coerente com alguns dos pressupostos assumidos na definição dos perfis de ocupação, não representando por isso um benefício significativo. Assim, optou-se pela abordagem mais simples de modo a tornar o processo de modelação mais intuitivo, na medida em que é mais fácil avaliar o impacto da alteração de determinados parâmetros característicos dos sistemas de climatização.

O objeto que permite a modelação de um sistema equivalente denomina-se *HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem* (Figura 21). As necessidades de aquecimento e arrefecimento são obtidas considerando que existe uma unidade que mistura o ar de exaustão com a porção de ar novo, definida pelo utilizador, e de seguida aquece/arrefece o ar de modo a que este possa ser insuflado no espaço com as condições de temperatura e humidade pretendidas. Este componente é bastante versátil e permite que sejam definidas várias características do equipamento, tais como, calendário de disponibilidade do sistema,

termostato de temperatura que pode variar consoante a altura do ano, capacidade máxima de aquecimento e/ou arrefecimento, caudal máximo de ar climatizado conforme o modo de operação, caudal de ar novo e existência ou não de recuperação de calor. Numa primeira abordagem foi utilizado um termostato igual para todas as zonas, devendo a temperatura dos espaços estar compreendida entre os 20°C e os 25°C.

HVAC Templates			Object Description: Zone with ideal air system that meets heating or cooling loads	
[0001] HVACTemplate:Thermostat			Field Description: Zone name must match a building zone name	
[0001] HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem			ID: A1	
			Select from list of objects	
Field	Units	Obj		
Zone Name				
Template Thermostat Name				
System Availability Schedule Name				
Maximum Heating Supply Air Temperature	C	50		
Minimum Cooling Supply Air Temperature	C	13		
Maximum Heating Supply Air Humidity Ratio	kgWater/kgDryA	0.0156		
Minimum Cooling Supply Air Humidity Ratio	kgWater/kgDryA	0.0077		
Heating Limit		NoLimit		
Maximum Heating Air Flow Rate	m3/s			
Maximum Sensible Heating Capacity	W			
Cooling Limit		NoLimit		
Maximum Cooling Air Flow Rate	m3/s			
Maximum Total Cooling Capacity	W			
Heating Availability Schedule Name				
Cooling Availability Schedule Name				
Dehumidification Control Type		ConstantSensibleHe		
Cooling Sensible Heat Ratio	dimensionless	0.7		
Dehumidification Setpoint	percent	60		
Humidification Control Type		None		
Humidification Setpoint	percent	30		
Outdoor Air Method		None		
Outdoor Air Flow Rate per Person	m3/s	0.00944		

Figura 21 – Exemplo de HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem e diferentes parâmetros que podem ser modelados

Para se obter o consumo energético associado à climatização é necessário dividir as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento, dadas pelo objeto HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem, pela eficiência característica dos diferentes equipamentos descritos na secção 4.3. Para além da eficiência do equipamento de produção térmica, foram também consideradas perdas de 10% nos sistemas de distribuição de frio e calor [47].

Uma vez que o objeto HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem é apenas associado a uma zona térmica, pode dar-se o caso de um equipamento de climatização afeto a várias zonas, por exemplo a caldeira do edifício, necessitar de fornecer uma potência superior à sua capacidade máxima. É por isso necessário ter em atenção este aspeto uma vez que pode dar origem a consumos de energia acima dos reais.

5.5. Calibração do Modelo de Simulação Dinâmica

Tendo como objetivo a certificação energética do edifício em análise, é conveniente que os resultados da simulação sejam o mais próximo possível da realidade, para tal deve ser feita uma calibração do modelo de simulação. O processo de calibração consiste no ajuste de certos parâmetros que não são conhecidos à partida, e sempre dentro de limites razoáveis, com o

objetivo de minimizar o desvio entre os resultados obtidos através da simulação e parâmetros cujo valor real é conhecido. Alguns dos parâmetros que podem ser ajustados no caso de não serem conhecidos são o caudal de infiltração, os horários de ocupação e utilização dos espaços ou os *setpoints* de temperatura dos equipamentos de climatização.

Uma vez que a monitorização das condições do ambiente interior não era viável, dada a grande heterogeneidade e dimensão do edifício, a calibração foi feita através dos valores de consumo energético registados em anos anteriores. Idealmente a calibração deveria ser feita com base em registos referentes a um período superior a um ano. No entanto, nos últimos anos têm sido realizadas algumas remodelações em diversos espaços do edifício, nomeadamente a substituição do contador de gás, e por isso optou-se por considerar como referência apenas os consumos energéticos do ano 2013.

Os resultados da simulação não são iguais aos consumos reais, e por esse motivo existe a necessidade de estabelecer uma margem de erro máxima de 10%. Essa margem de erro é aplicada ao desvio do consumo energético anual obtido através da simulação em relação ao consumo energético das faturas. Analisou-se ainda o desvio médio mensal, calculado através da equação 23 [48], e admitiu-se que este não deveria ser superior a 15%.

$$Erro\ Médio = \frac{100\%}{12} \times \sum_{i=1}^{12} \left| \frac{ConsumoSimulação_i - ConsumoReal_i}{ConsumoReal_i} \right| [\%] \quad (23)$$

Uma discrepância muito grande entre o consumo real e o simulado pode indicar que alguns dos pressupostos assumidos inicialmente não correspondem aquilo que se passa na realidade. Outro aspeto que pode acentuar esta diferença é o facto do clima existente durante o ano de referência, 2013, poder ser diferente do clima do ano típico utilizado na simulação. A utilização de dados de consumo de vários anos como valor referência poderia atenuar este facto, no entanto, tal como já foi referido anteriormente, no edifício em questão não é possível considerar mais do que um ano.

Numa primeira abordagem constatou-se que o desvio anual entre o consumo energético do modelo de simulação e o consumo real era 29%. Contudo, avaliando o desvio referente a cada fonte de energia (Tabela 14) verifica-se que o erro global advém principalmente de um consumo de gás bastante inferior no modelo de simulação, em comparação com aquele que é observado na realidade.

Tabela 14 – Comparação entre o consumo obtido através da primeira simulação e o consumo real

	Consumo Real [kWh]	Consumo Simulação [kWh]	Erro [%]
Gás	682	175	74.3
Eletricidade	904	946	4.6
Total	1585	1121	-29.3

Tendo em conta que em diversos espaços não existem sistemas de ventilação, e que durante as várias visitas realizadas ao edifício se verificou que muitas vezes a abertura das janelas é utilizada

para compensar este facto, independentemente das condições verificadas no exterior, considerou-se que nestes espaços a infiltração deveria ser igual à dos espaços que estão durante largos períodos em contacto com o exterior, duas renovações por hora. Outro parâmetro que pode ter originado o baixo consumo de gás é o termostato definido. Ao contrário dos sistemas mais modernos, os radiadores não dispõem de válvulas termostato que permitem controlar o funcionamento dos mesmos em função da temperatura. O sistema existente obriga a que sejam os ocupantes a fechar a válvula que permite a circulação de água quente se pretenderem cessar a climatização. Logo é pouco provável que isso aconteça assim que a temperatura interior chegue aos 20°C, uma vez que o mais provável é que os ocupantes apenas reajam quando sentirem que o espaço se encontra excessivamente quente. Assim, optou-se por considerar que os radiadores se mantiveriam em funcionamento até que a temperatura do ar interior atingisse os 22°C. Com as alterações efetuadas, os valores de consumo da simulação aproximaram-se bastante dos valores reais, tal como é possível observar na Tabela 15.

Tabela 15 – Comparação entre o consumo obtido através da simulação final e o consumo real

	Consumo Real [kWh]	Consumo Simulação [kWh]	Erro [%]
Gás	682	635	-6.9
Eletricidade	904	946	4.6
Total	1585	1581	-0.3

Analisando a variação mensal do consumo de energia do edifício e o seu desvio em relação ao consumo real (Gráfico 2) verificamos que este não ultrapassa os 15%, premissa que tinha sido considerada importante para se poder afirmar que o modelo se encontra calibrado.

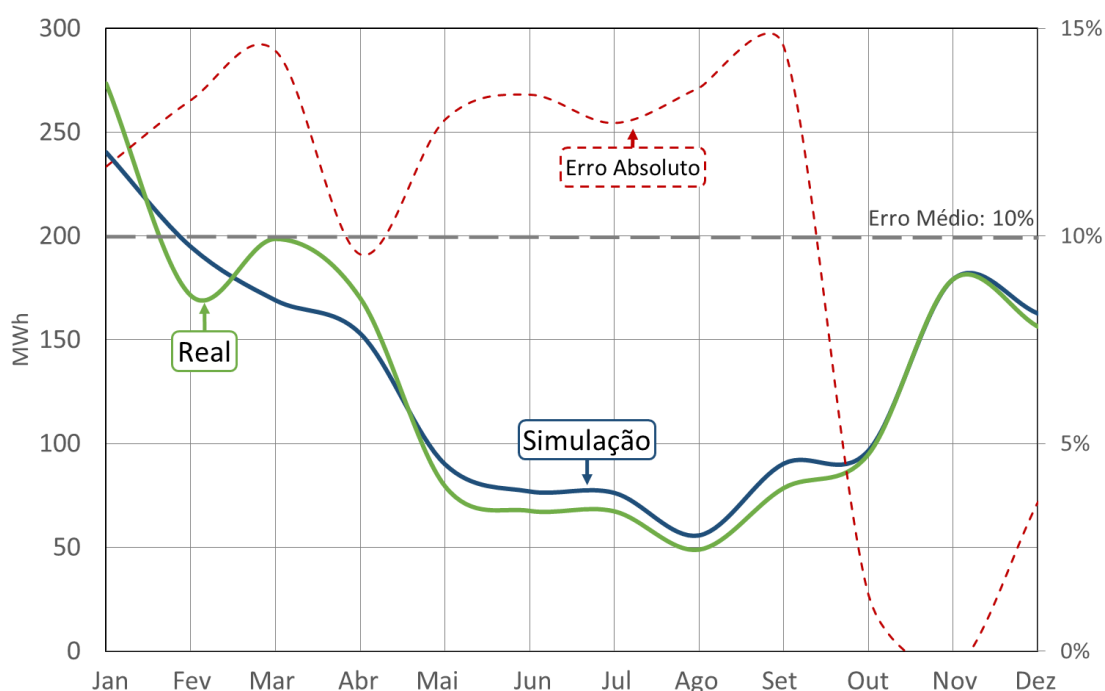


Gráfico 2 - Variação mensal do consumo e respetivo erro absoluto

A partir dos resultados obtidos e considerando que o modelo de simulação criado é representativo do edifício real é possível avançar para uma análise detalhada dos consumos de energia obtidos.

5.6. Desagregação de Consumos

A diferenciação da origem do consumo de energia é feita com base nos resultados obtidos a partir da simulação. Como se pode observar na Figura 22 a maior parcela de consumo energético é devida à climatização do edifício, dividindo-se o resto do consumo pelos equipamentos e iluminação praticamente na mesma proporção.

Normalizando o consumo por unidade de área, obtém-se um consumo global de 155 kWh/m², valor que se encontra abaixo da média europeia para edifícios académicos, de 190 kWh/m² [49]. Do valor global, 42 kWh/m² corresponde à iluminação, 45 kWh/m² são referentes aos equipamentos e 67 kWh/m² estão associados à climatização. O consumo associado à iluminação é superior ao que é verificado em média nos edifícios de educação [50] em cerca de 17 kWh/m².

É possível verificar que grande parte do consumo associado à climatização do edifício tem como origem o gás natural. Este facto deve-se à baixa eficiência do sistema de aquecimento e distribuição de água quente para os radiadores. A reduzida fração de consumo de climatização com origem elétrica prende-se com o facto destes sistemas mais recentes, e por isso mais eficientes, terem sido instalados em espaços pouco utilizados, como os auditórios da prumada nordeste e a sala Actos, na reitoria, utilizados apenas esporadicamente para a realização de eventos.

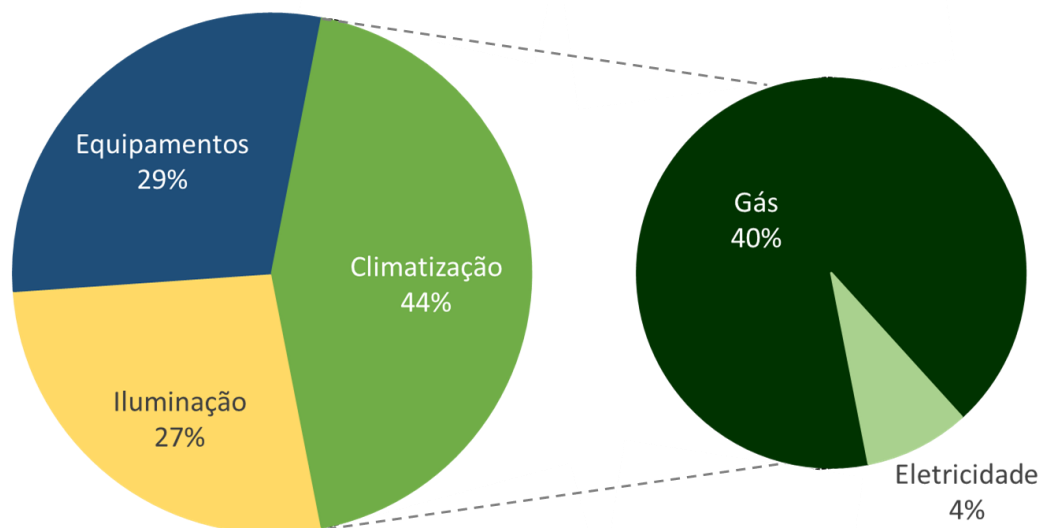


Figura 22 – Desagregação dos consumos por tipo de utilização final

Analisando mais detalhadamente o consumo de energia associado à iluminação (Figura 23) constata-se que, tal como seria de esperar, a maior parcela de consumo é devida às lâmpadas

fluorescentes tubulares T8, uma tecnologia desatualizada e pouco eficiente. Para além de ser a tecnologia mais presente, é também aquela que está instalada nos espaços com mais horas de funcionamento, como as salas de aulas, corredores e a maioria dos gabinetes. As lâmpadas de halogéneo, LED e de descarga representam um consumo residual visto que a sua presença no edifício é pouco significativa.

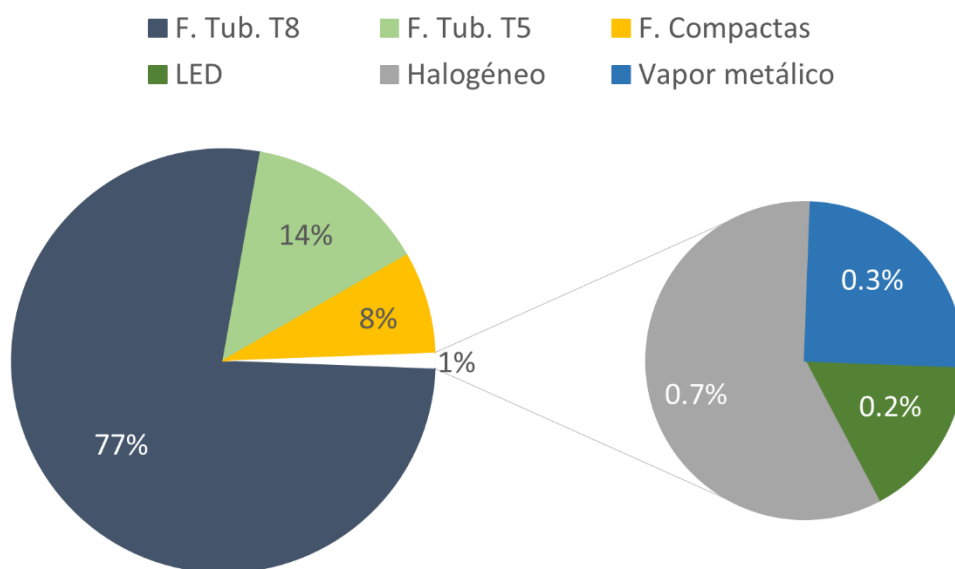


Figura 23 – Consumo de energia associado a cada um dos tipos de tecnologia de iluminação

5.7. Análise qualitativa do sistema de iluminação

Juntamente com a análise do consumo do edifício, foi também feita uma avaliação qualitativa do sistema de iluminação do edifício. Este processo tem o objetivo principal de quantificar a área do edifício que dispõe de sistemas de iluminação eficientes e adequados ao tipo de ocupação.

Para caracterizar o sistema de iluminação foram realizadas medições de iluminância que permitiram verificar se os níveis de luminosidade estavam de acordo com os níveis recomendados na legislação em vigor [51]. Os locais onde foram efetuadas medições foram escolhidos de modo a que a amostra obtida fosse a mais representativa possível das várias configurações existentes no edifício.

Nos testes de iluminância, realizados com um luxímetro Extech 401036 (Figura 24), registaram-se os níveis de iluminância, medidos em lux, em vários pontos de cada espaço. A unidade de medida *lux* representa o fluxo luminoso que atinge uma superfície com 1 m² de área. As medições foram realizadas no plano de trabalho, colocando o aparelho a cerca de 0.8 m do pavimento e, sempre que possível, sem iluminação natural. Em espaços como corredores e escadas o aparelho foi colocado ao nível do pavimento, visto que não existe plano de trabalho. O valor obtido foi comparado com os valores recomendados pela norma europeia [51] de modo a verificar a qualidade da iluminação existente.



Figura 24 – Sensor de luminosidade utilizado nas medições de iluminância

Para além da iluminância, foi utilizado outro parâmetro, a densidade de Potência por 100 *lux* para medir a eficiência da iluminação, dado pela equação 24.

$$\frac{DPI}{100 \text{ lux}} \left[\frac{\frac{W}{m^2}}{100 \text{ lux}} \right] = \frac{\left(\frac{\text{Potência}}{\text{Área}} \right)}{LUX} \times 100 \quad (24)$$

Esta unidade representa a potência necessária por m^2 para garantir uma iluminância de 100 *lux*, permitindo assim avaliar a eficiência do equipamento em análise. A iluminância quantifica a eficácia do sistema de iluminação enquanto a densidade de potência por 100 *lux* determina a sua eficiência.

De modo a poder simplificar análise dos valores registados, foram definidas três classes: Insuficiente, Eficiente e Ineficiente. O primeiro factor de diferenciação é a iluminância registada, que divide os espaços em Suficientes ou Insuficientes. No segundo caso, não se avaliou a eficiência da iluminação visto que é pouco relevante estudar a performance energética quando não são garantidos os valores mínimos desejáveis. Dos espaços que foram considerados como Suficientes, é ainda avaliada a eficiência com que são obtidos os níveis de iluminância exigidos.

Tal como esquematizado na Figura 25, 28% da área total do edifício tem iluminação insuficiente, ou seja, o fluxo luminoso medido no local é inferior ao recomendado pela norma europeia. Da área considerada como bem iluminada, 72% do total do edifício, apenas 17% é feita de forma eficiente, o que indica que pode haver um forte potencial de poupança na área da iluminação.

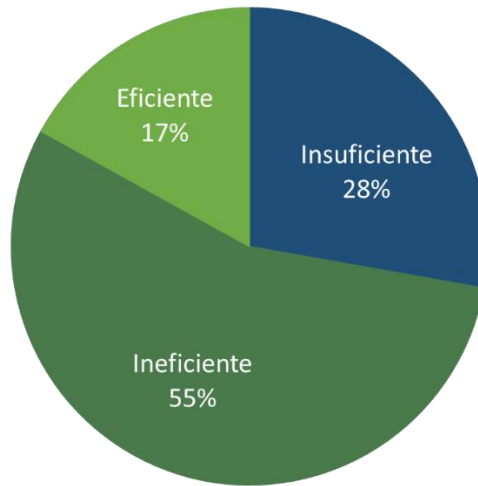


Figura 25 – Avaliação da qualidade da iluminação existente, percentagem de área correspondente a cada classe;

5.8. Procedimento de Certificação

A classe energética é definida com base no rácio de classe energética (R_{IEE}) dado pela equação 25 [52].

$$R_{IEE} = \frac{IEE_s - IEE_{REN}}{IEE_{ref,S}} \quad (25)$$

Onde:

- IEE_s - Indicador de eficiência energética do edifício em análise, e corresponde ao IEE_{pr} (indicador de eficiência energética do modelo previsto), obtido através de simulação dinâmica multizona [$kWh_{EP}/(m^2.ano)$];
- IEE_{REN} - Indicador de eficiência energética associado à produção de energia renovável, uma vez que neste edifício não existem sistemas de produção renovável este parâmetro é nulo [$kWh_{EP}/(m^2.ano)$];
- $IEE_{ref,S}$ - Indicador de eficiência energética do edifício de referência obtido através de simulação dinâmica multizona [$kWh_{EP}/(m^2.ano)$];

Os indicadores de eficiência energética do modelo Previsto e do modelo de Referência apenas têm em consideração consumos de energia associados a iluminação interior, aquecimento de águas sanitárias e aquecimento e arrefecimento do ar ambiente. O consumo associado a iluminação exterior, escadas rolantes e elevadores ainda não é contabilizado mas passará a integrar o cálculo do IEE a partir de 1 de Janeiro de 2016, inclusive. Os equipamentos não intrínsecos ao edifício, como por exemplo computadores e arcas frigoríficas, também não são considerados no cálculo do indicador de eficiência energética. Em ambos os casos, modelo Previsto e modelo de Referência, é necessário considerar o factor de conversão entre energia final e energia primária estipulado por lei [53].

Na Tabela 16 estão definidos os intervalos que correspondem a cada uma das classes energéticas. Resumidamente temos dois grupos, os edifícios que têm um consumo inferior ao modelo de referência, com uma classe entre o A+ e o B-, e os edifícios com um consumo superior ao do modelo de referência, classificados entre a classe C e a classe F.

Tabela 16 - Classe energética e correspondente intervalo de IEE

Valor RIEE	Classe Energética
$RIEE \leq 0.25$	A+
$0.25 < RIEE \leq 0.5$	A
$0.5 < RIEE \leq 0.75$	B
$0.75 < RIEE \leq 1$	B-
$1 < RIEE \leq 1.5$	C
$1.5 < RIEE \leq 2$	D
$2 < RIEE \leq 2.5$	E
$RIEE > 2.5$	F

No âmbito da certificação energética devem ainda ser apresentadas medidas de melhoria de desempenho energético, indicando a sua viabilidade e o seu impacto no edifício, quer a nível de consumo energético quer a nível de classe energética.

5.8.1. Modelo Previsto

O Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Edifícios [3] impõe diversas condições que devem ser respeitadas na simulação do modelo Previsto, como tal, alguns parâmetros considerados na calibração do modelo tiveram que ser alterados.

Os aspetos alterados são:

- No caso de existirem, os dispositivos móveis de sombreamento encontram-se ativos sempre que a radiação solar incidente na fachada é superior a 300 W/m^2 ;
- A temperatura interior deve estar compreendida entre os 20°C e os 25°C em todos os espaços do edifício;
- Nos espaços onde não existe ventilação mecânica deve ser considerado que a ventilação é feita de forma natural, sendo o caudal de ar novo correspondente ao valor mínimo determinado pelo método prescritivo;
- Os equipamentos de climatização devem funcionar sempre que os espaços se encontram ocupados.

5.8.2. Modelo de Referência

A criação do modelo de referência têm como objetivo definir um edifício padrão que sirva como termo de comparação para o edifício a certificar.

As alterações consistem em:

- Alteração dos coeficientes de transmissão térmica da envolvente, tanto dos elementos opacos como dos vãos envidraçados;
- A área total de vão envidraçado corresponde a 30% da área total de fachada;
- Eficiência dos equipamentos de climatização é igual ao valor da classe correspondente ao mínimo aplicável, independentemente do sistema existente na realidade;
- Densidade de potência de iluminação correspondente ao requisito mínimo aplicável, considerando os níveis de iluminância iguais aos recomendados na norma europeia [51].

5.8.3. Classe Energética

Depois de analisado e descrito o consumo do edifício procedeu-se então à simulação do modelo previsto e do modelo de referência. Na Tabela 17 é apresentado o consumo associado a cada componente. O edifício I do ISCTE-IUL apresenta um rácio de classe energética de 0.99, que corresponde à classe B-.

Tabela 17 – Resumo dos valores obtidos referentes aos modelos de simulação dinâmica.

	Ilum. [MWhep]	Aque. [MWhep]	Arref. [MWhep]	Vent. [MWhep]	Equip. [MWhep]	IEEs [kWhep/m²]	RIEE	Classe Energética
<i>Pr.</i>	1040	148	227	27	1180	140	0.99	B-
<i>Ref.</i>	866	201	198	191	1180	142		

Como se pode observar na Figura 26, o comportamento dos dois modelos do edifício é bastante idêntico. Tal como já tinha sido verificado anteriormente, a iluminação existente é ineficiente, existindo por isso um maior consumo associado à mesma no modelo previsto do que no modelo de referência. Também a energia despendida na climatização do edifício difere entre os dois modelos. Os vãos envidraçados do modelo de referência têm um fator solar de 0.2, bastante inferior aos vidros sem película existentes no edifício, no 0.33 caso dos vidros duplos (Anexo II) e 0.85 no caso dos vidros simples [54]. O fator solar (g) é dado pela razão entre a quantidade total de energia que entra através do vidro e a radiação que nele incide. Um valor de g muito baixo faz com que os ganhos solares não sejam aproveitados, aumentando as necessidades de aquecimento no Inverno e reduzido as necessidades de arrefecimento no Verão, tal como acontece no edifício de referência.

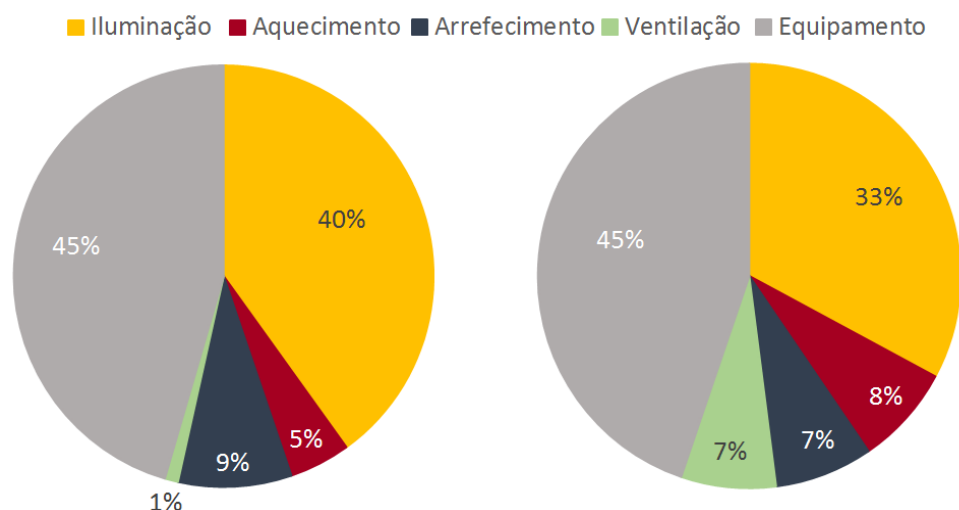


Figura 26 – Distribuição do consumo por utilização final, modelo previsto, à esq., e modelo de referência, à dir.

5.9. Medidas de Melhoria

Um dos sectores onde é possível melhorar o desempenho energético é o sector da iluminação. Outro campo que pode ser explorado é climatização do edifício, nomeadamente com a substituição da caldeira, que fornece água quente aos radiadores e apresenta um baixo rendimento, responsável por uma parte substancial do consumo de energia do edifício.

5.9.1. Renovação do sistema de iluminação

Considerando que o objetivo principal da renovação da iluminação passa pela redução do consumo energético associado à mesma, o tipo de lâmpadas que apresenta maior potencial de redução é o fluorescente tubular T8. A solução escolhida para a substituição são as lâmpadas fluorescentes tubulares T5, que para além de serem mais eficientes tendo em conta a razão lúmen/W [55], utilizam balastros eletrónicos em vez de balastros ferromagnéticos como os existentes nas luminárias presentes no edifício. A alteração do tipo de balastro permite uma poupança extra porque os balastros eletrónicos não implicam um consumo adicional de energia. Uma vez que o casquilho e os balastros utilizados pelas lâmpadas fluorescentes T5 são diferentes dos das lâmpadas fluorescentes T8, é também necessário substituir as luminárias.

Para além da substituição das lâmpadas fluorescentes T8, também foi estudado o impacto da substituição das lâmpadas de halogéneo. Apesar de não apresentar um peso significativo no consumo energético do edifício, esta tecnologia apresenta uma fraca eficiência luminosa e um tempo de vida bastante curto quando comparadas com as alternativas [56]. Optou-se por apenas considerar alternativas LED com o mesmo tipo casquilho (GU 5.3) de modo a evitar a substituição da luminária.

Nos espaços em que se procedeu à substituição do sistema de iluminação foi garantido que os níveis de luminosidade recomendados pela norma europeia [51] eram cumpridos.

A substituição do sistema de iluminação permite uma poupança de 180 kWh, correspondentes a cerca de 40% do consumo anual de energia associado à iluminação.

5.9.2. Substituição da Caldeira

A substituição da caldeira a gás por uma bomba de calor implica uma cuidada análise de todo o sistema de distribuição de água quente, pois o sistema existente atualmente pode não ser compatível com as especificações de um sistema mais recente.

Uma vez que a informação sobre o sistema presente no edifício é bastante reduzida, será avaliado apenas o impacto da substituição do sistema de produção de água quente existente por uma bomba de calor com uma potência semelhante. Como alternativa à caldeira, foi escolhida uma bomba de calor reversível (a capacidade de refrigeração não seria utilizada neste caso) da *CLIMAVENETA* modelo *NECS-N 2116* com um COP de 3.39 (Anexo III).

Com esta medida é possível reduzir o consumo de energia em cerca de 75%, passando dos atuais 635 MWh para os 140 MWh. Ao substituir a caldeira, também existe uma transição do consumo de gás para o consumo de energia elétrica, que se traduz numa redução bastante significativa da quantidade de CO₂ emitido, passando dos 130 tonCO₂/ano emitidos atualmente para os 51.5 tonCO₂/ano. O fator de conversão de energia primária em kgCO₂ é definido pelo despacho nº 15793-D de 2013 [53].

5.9.3. Impacto das medidas na classe energética

O impacto das medidas de eficiência energética na classe atribuída ao edifício tem de ser avaliado através de simulação dinâmica, uma vez que estas influenciam o balanço energético do edifício e o seu impacto não se limita ao seu consumo direto. Por exemplo no caso de substituições no sistema de iluminação, para além do consumo que lhe é intrínseco, também existe impacto nos consumos associados à climatização, como se pode observar na Tabela 18.

Para ser avaliado o impacto da substituição da caldeira por uma bomba de calor foi necessário criar um novo modelo de referência, alterando a eficiência do sistema de climatização. Na Tabela 18 e Tabela 19 são apresentados os valores dos diferentes modelos analisados.

Tabela 18 - Impacto da renovação do sistema de iluminação na classe energética

	Ilum. [MWhep]	Aque. [MWhep]	Arref. [MWhep]	Vent. [MWhep]	IEEs [kWhep/m²]	Emissões CO ₂ [kgCO ₂ /m²]	RIEE	Classe Energética
<i>Previsto</i>	1040	148	217	27	140	21	0.99	B-
<i>Previsto (subs. Ilum.)</i>	596	174	173	27	95	15	0.67	B
<i>Referência</i>	866	201	198	191	142	21	-	

O impacto da renovação do sistema de iluminação é bastante mais significativo do que a substituição da caldeira por uma bomba de calor, sendo mesmo a única medida de eficiência energética capaz de fazer alterar a classe energética, passando assim o edifício a ter classe B. Tal como referido anteriormente, esta medida também tem influência no consumo de energia associado à climatização. Ao reduzir a quantidade de ganhos internos, é necessária mais energia para aquecimento no inverno e menos energia para arrefecimento no verão. Esta alteração permite uma redução de cerca de 30 % do consumo energético anual do edifício.

Tabela 19 - Impacto da substituição da caldeira na classe energética

	Illum. [MWhep]	Aque. [MWhep]	Arref. [MWhep]	Vent. [MWhep]	IEEs [kWhep/m ²]	Emissões CO ₂ [kgCO ₂ /m ²]	RIEE	Classe Energética
<i>Previsto (subs. B.C.)</i>	1040	104	217	27	135	20	0.97	B-
<i>Previsto (subs. Illum.+B.C.)</i>	596	119	173	27	89	13	0.63	B
<i>Referência (B.C.)</i>	866	175	198	191	139	20	-	

É de realçar que o impacto das medidas estudadas na classe energética não é necessariamente igual àquele que se verificaria no funcionamento do edifício na realidade, uma vez que na definição dos modelos de simulação dinâmica o regulamento impõe certas condições que podem não se verificar na realidade.

6. Caso de Estudo – Sala de Estudo do Edifício I

A sala de estudo, localizada na ala norte do piso 1 (Figura 27), surgiu como objeto de estudo depois de reportadas queixas de desconforto, tanto térmico como a nível da qualidade do ar interior, por parte dos ocupantes. Numa primeira análise, verificou-se que este espaço não dispõe de qualquer sistema de climatização, havendo apenas um ventilador de extração que faz a remoção dos poluentes emitidos pelos ocupantes.

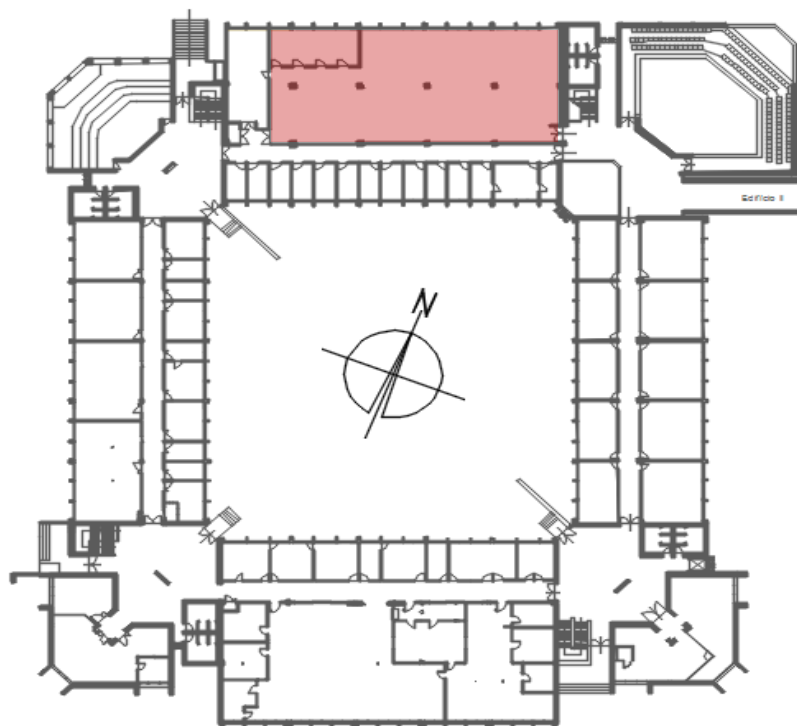


Figura 27 – Localização da sala de estudo (a vermelho) no Piso 1

Recentemente foi colocada a hipótese de integrar a sala de estudo no sistema de climatização afeto aos auditórios da prumada nordeste, descrito na secção 4.3.2, no entanto não é garantido que este tenha capacidade suficiente para satisfazer as necessidades de todos os espaços em simultâneo. Deste modo torna-se pertinente avaliar a capacidade dos equipamentos existentes em servir a sala de estudo, bem como a possibilidade de usar outros sistemas como alternativa, como, por exemplo, um sistema de ventilação natural ou um sistema híbrido.

6.1. Monitorização

De modo a identificar a origem dos problemas reportados, procedeu-se à recolha de dados que pudessem caracterizar as condições interiores da sala durante um dia de normal funcionamento da mesma. A monitorização da sala de estudo foi realizada entre as 8h e as 20h do dia 3 de Junho de 2014, período em que decorria a época de exames do segundo semestre e altura mais crítica devido à conjugação de uma elevada taxa de ocupação da sala e temperaturas exteriores mais

elevadas. Durante este período foram registados dados relativos a diversas grandezas importantes na caracterização das condições interiores da sala de estudo:

- A temperatura do ar interior e a concentração de CO₂, com um tempo de amostragem de 1 minuto;
- O número de luminárias acesas, pessoas presentes na sala, computadores ligados e janelas abertas, com registos a cada 10 minutos;
- E a temperatura das superfícies da envolvente, tanto interiores como exteriores, com um intervalo de 30 minutos entre registos.

O período de amostragem varia consoante o parâmetro em questão pois, considerando a natureza dos mesmos, nem sempre se justifica um tempo de amostragem menor. A obtenção destes dados permitirá validar os resultados obtidos através da simulação dinâmica de um modelo representativo da sala de estudo. O registo dos dados foi feito com recurso a cinco equipamentos:

- Três Data loggers HOBO que medem a temperatura e a humidade relativa do ar interior, acoplados a sensores de CO₂, que registam a concentração de CO₂ no ar interior;
- Sensor ALVi, um sistema de monitorização de condições de conforto interior que regista os seguintes parâmetros: temperatura e humidade, concentração de CO₂, intensidade luminosa e nível ruído;
- Câmara de Infravermelhos FLIR i7, para registo da variação das temperaturas superficiais da envolvente.



Figura 28 – Equipamentos Utilizados na monitorização da sala de estudo

Os quatro equipamentos foram dispostos na sala, tal como demonstrado Figura 29, de forma a abranger o máximo de área de recolha possível e evitando a proximidade com elementos que pudessem gerar perturbações na recolha de dados, como por exemplo portas e janelas. Tendo em conta que o acesso à sala pequena, com 43 m², é restrito a pessoas autorizadas, só foram instalados equipamentos na sala comum, com 385 m². Devido à fragilidade dos mesmos, e à expectativa de uma elevada taxa de ocupação da sala, não foi possível colocar os diversos equipamentos à altura ideal, o plano de trabalho. Como tal, estes foram instalados a cerca de 2 metros de altura em relação ao chão, de forma a estarem mais resguardado dos ocupantes.

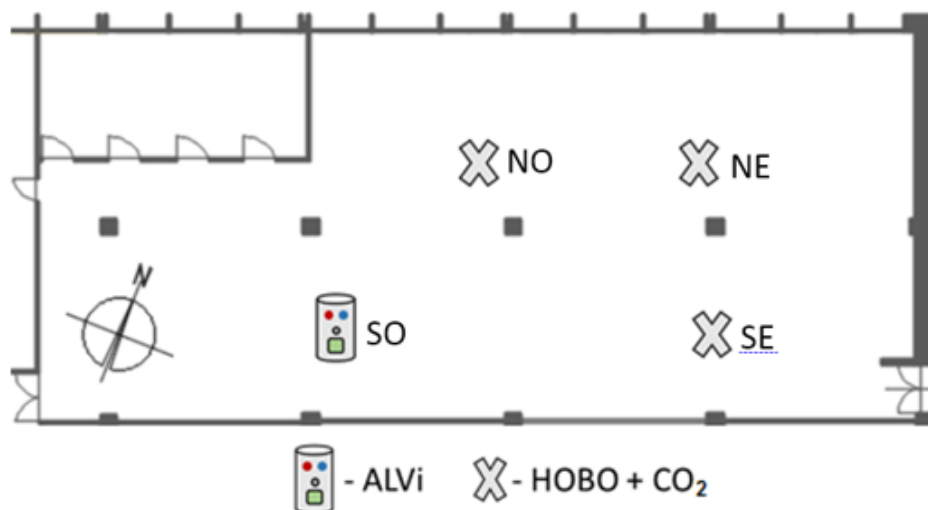


Figura 29 – Disposição dos equipamentos instalados

Depois de recolhidos os dados é possível verificar que a temperatura registada no interior (Gráfico 3) atingiu um máximo de 27.4°C no lado sul da sala. Este valor encontra-se fora do intervalo de temperaturas de conforto térmico definido regulamentarmente, segundo o qual a temperatura do ar interior deve estar compreendida entre 20°C e 25°C [3]. No caso da concentração de CO₂ (Gráfico 4), o limite regulamentar de 1625 ppm não foi atingido, sendo o valor máximo registado de 882 ppm.

É de realçar o forte impacto que a abertura de apenas três janelas tem, por volta das 18:00 horas, tanto na temperatura, que baixa cerca de 2 °C, como na concentração de CO₂, que passa para quase metade do valor.

A concentração de CO₂ está correlacionada com o número de pessoas que se encontram no interior da sala, como se pode observar no Gráfico 4, sendo visível que durante o período de almoço, entre as 12h e as 14h, existe uma notória redução da concentração de CO₂.

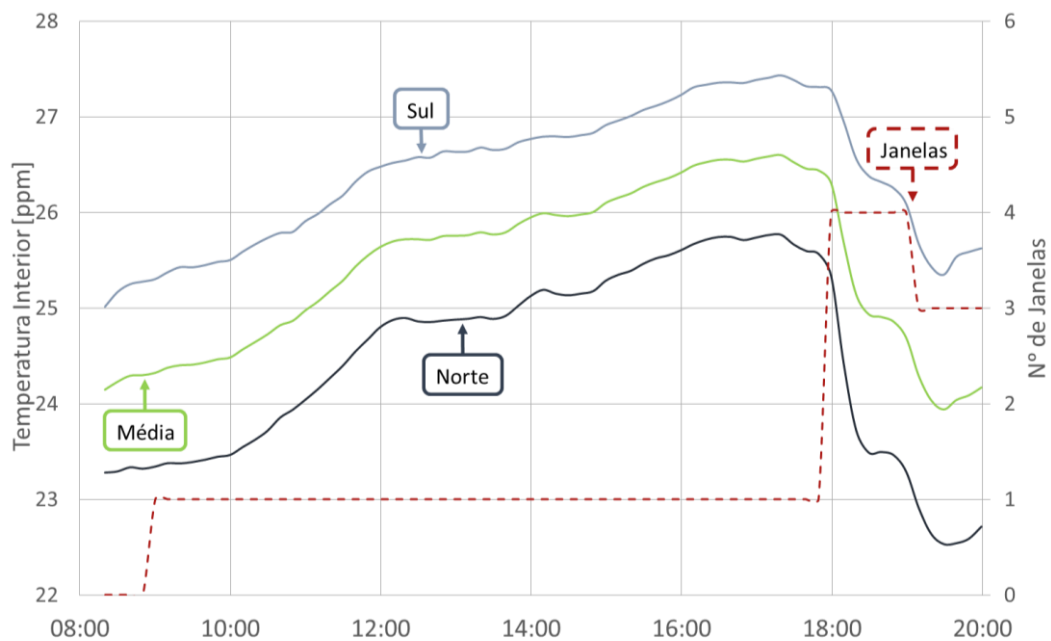


Gráfico 3 - Temperatura do ar interior da sala de estudo e nº de Janelas abertas registados durante a monitorização

Outro aspeto a realçar é a diferença entre os valores registados nos pontos a norte e nos pontos a sul. Tanto a concentração de CO_2 como a temperatura do ar são mais elevadas nos pontos sul, mais distantes das janelas, do que nos pontos norte.

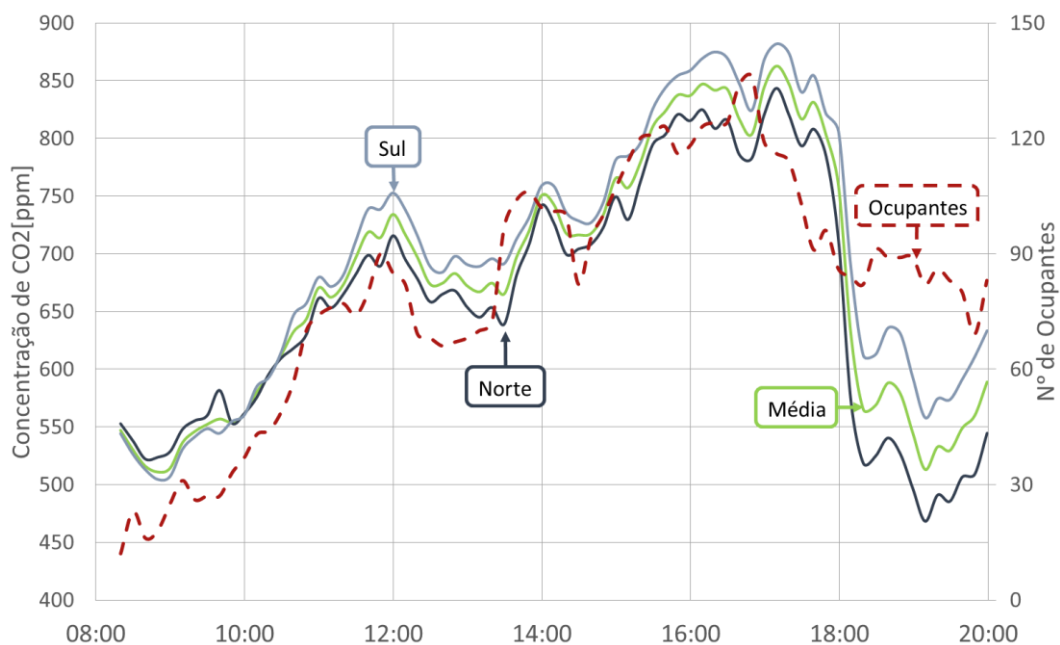


Gráfico 4 - Concentração de CO_2 da sala de estudo e nº de ocupantes registados durante a monitorização

Tendo em conta o impacto da abertura das janelas, visível em ambos os parâmetros registados, é de esperar que a utilização da ventilação natural seja bastante benéfica para a qualidade do ambiente interior.

6.2. Estimativa do Caudal de Ar Novo

A geração de CO₂ metabólico no interior de um espaço depende da ocupação do mesmo e do tipo de atividade desenvolvido no interior do espaço e pode ser calculada recorrendo às equações presentes no *ASHRAE Handbook of Fundamentals* [43], que relacionam a taxa de consumo de oxigénio (\dot{q}_{O_2}) com a taxa de atividade metabólica (M).

$$\dot{q}_{O_2} = \frac{0,00276 \times A_{Du} \times M}{0,23 \times RQ + 0,77} \quad (26)$$

Onde:

- A_{Du} é a área de *DuBois*, em m², correspondente à área de superfície do corpo humano, dada por $A_{Du} = 0,202 \times Ma^{0,425} \times H^{0,725}$, sendo Ma a massa corporal do ocupante, em quilogramas, e H a sua altura, em metros;
- M é a taxa de atividade metabólica, em met, que varia conforme o tipo de atividade desempenhado pelo ocupante;
- RQ é o coeficiente respiratório, dado pela razão entre o volume de CO₂ emitido e o volume de O₂ consumido.

Para um adulto típico, com uma área corporal de 1,8 m², e um nível metabólico correspondente a trabalho de escritório, 1 met, temos um rácio RQ igual a 0,83 [57]. Obtém-se assim uma taxa de consumo de O₂ igual a 0,0052 l/s.

A partir da taxa de produção de O₂ e tendo em conta que é conhecido o quociente de respiração, obtém-se uma taxa de emissão de CO₂ (\dot{q}_{CO_2}) de 0,0043 l/s. Sabendo que para uma temperatura do ar de 20 °C a densidade do dióxido de carbono é 1,98 kg/m³, o caudal de emissão de CO₂ pode ser expresso em 0.031 kg/h.

Para além do dióxido de carbono gerado pelos ocupantes é necessário ter em conta a concentração de CO₂ do ar insuflado na sala. No caso da sala de estudo, o sistema de ventilação é composto apenas por um ventilador de extração que, ao retirar ar do interior da sala, coloca a mesma em depressão face aos espaços adjacentes, dando origem a um fluxo de ar da envolvente para o interior da sala. O facto de não existir um sistema de insuflação de ar novo faz com que o ar que entra na sala possa já estar viciado. Se não existirem janelas abertas na sala de estudo que promovam a ventilação natural, o ar provém do interior do edifício e como tal, devido à existência de ocupantes no interior do mesmo, terá uma concentração de CO₂ superior ao ar exterior.

Para efeitos do cálculo do caudal de ar novo foi considerado que todo o ar insuflado na sala era proveniente do exterior, sendo a sua concentração de CO₂ igual a 390 ppm, o que corresponde a 713 mg/m³. Esta consideração é razoável na medida em que existiu sempre pelo menos uma janela aberta durante o período de monitorização e para além disso, devido à limitação do número de equipamentos, não foi possível recolher dados sobre a concentração de CO₂ nos espaços envolventes.

Pelo princípio de conservação de massa, que estabelece que a massa de ar que entra num volume deve ser igual á massa de ar que sai do mesmo em todos os instantes, e conhecendo a concentração de dióxido de carbono do ar interior, é possível obter o caudal de ventilação para cada instante através da equação 27.

$$[CO_2]_{insuf} \times \dot{V}_{ar}(t) + \dot{q}_{CO_2} \times \frac{n^o \text{ de ocupantes}(t)}{3600} = [CO_2]_{int}(t) \times \dot{V}_{ar}(t) \quad (27)$$

Onde:

- \dot{V}_{ar} é o caudal de ar novo insuflado no espaço, em m³/s;
- $[CO_2]_{insuf}$ é a concentração de dióxido de carbono do ar insuflado, que neste caso se considerou ser todo proveniente do exterior, em kg/m³;
- $[CO_2]_{int}$ é a concentração de dióxido de carbono do ar interior registada durante a monitorização, em kg/m³;
- \dot{q}_{CO_2} é a taxa de produção de dióxido de carbono por ocupante em kg/h, calculada anteriormente.

Depois de efetuado o cálculo do caudal de ventilação de ar novo, verifica-se que, como seria de esperar pelos valores de CO₂ registados, a abertura das janelas tem um forte impacto no caudal de ventilação de ar novo (Gráfico 5), sendo este bastante mais significativo no lado norte, onde se encontram as janelas, do que no lado sul.

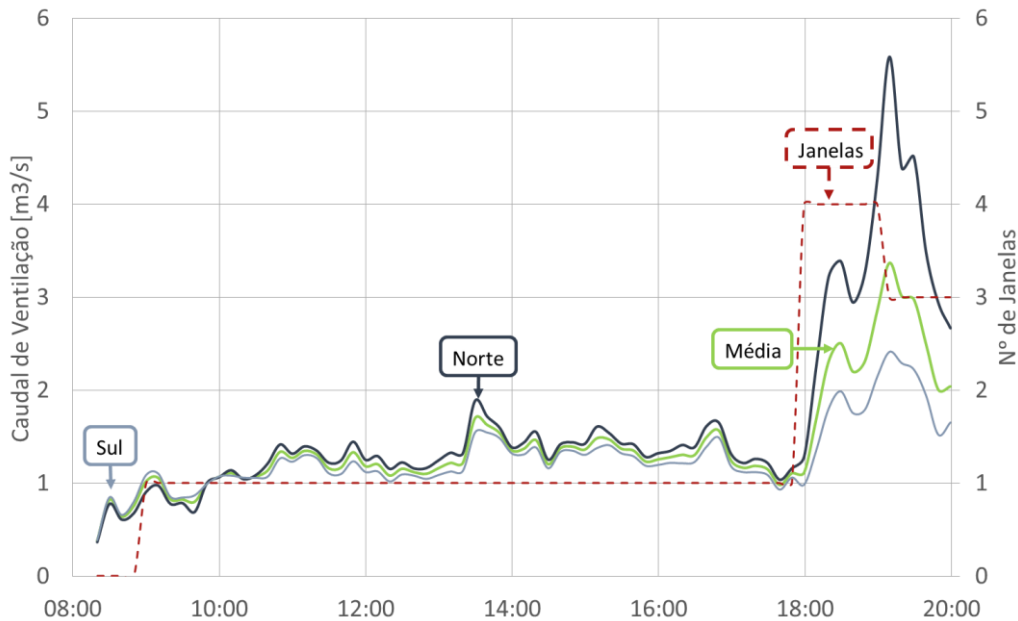


Gráfico 5 – Caudal de ventilação obtido em função da concentração de CO₂ interior

Para esta tipologia de espaços, o caudal de ventilação definido por lei corresponde a 24 m³/(hora.pessoa). Tendo em conta que o número máximo de pessoas presentes na sala foram 130 pessoas, o caudal de ventilação deve ser no mínimo 0.867 m³/s. Tal como se pode verificar no Gráfico 5, este valor é cumprido a partir do momento em que se abre uma das janelas, por volta das 9h.

A diferença entre a temperatura e o caudal de ventilação verificados entre o lado norte e o lado sul pode gerar desconforto nos ocupantes que se encontram mais perto das janelas, quer devido à elevada diferença de temperaturas entre o ar interior e exterior em dias mais frios, quer devido à elevada velocidade de ar que se verifica junto á janela. Este facto pode fazer com que os ocupantes evitem abrir as janelas, o que leva a um aumento da temperatura do interior da sala e da concentração de CO₂ no ar, provocando igualmente desconforto aos ocupantes.

6.3. Modelo Dinâmico de Simulação

Tal como para a certificação do edifício, o modelo de simulação dinâmico da sala de estudo deve também ser validado. A validação dos dados obtidos através da simulação deve ser feita para as mesmas condições meteorológicas que se verificaram no dia em que foi realizada a monitorização.

As grandezas necessárias para se poder caracterizar o dia em questão são: temperatura de bolbo seco, humidade relativa, velocidade e direção do vento, radiação direta normal e horizontal e radiação difusa horizontal. Os quatro primeiros parâmetros foram disponibilizados pelo Instituto Geofísico do Infante D. Luís, que os observa numa estação existente no Jardim Botânico da Universidade de Lisboa, que se situa a cerca de 3 km do campus do ISCTE-IUL. Os dados referentes à radiação foram estimados a partir da radiação extraterrestre (calculada) e da radiação global horizontal, obtida a partir do piranómetro instalado no seguidor solar *Circadian* do campus solar da FCUL, tal como explicado no Anexo IV.

Neste caso, em vez do consumo mensal de energia utilizado anteriormente, serão utilizados como parâmetros de comparação os dados registados durante a monitorização da sala de estudo. Na simulação devem ser considerados o número de pessoas e computadores verificados durante a monitorização.

O erro absoluto entre os valores obtidos através da simulação e os valores medidos é definido pela equação 28.

$$Erro\ absoluto = \left| \frac{ValorMedido - ValorSimulado}{ValorMedido} \right| [\%] \quad (28)$$

De modo a tornar o processo de simulação menos moroso foram considerados apenas a ala norte e os cantos noroeste e nordeste do edifício I (Figura 30). As restantes zonas do edifício não foram consideradas já que não se encontram em contacto com a sala de estudo. Nos espaços sobre os quais não existem dados, todos os outros com exceção da sala de estudo, foram considerados os mesmos calendários de ocupação e utilização de equipamentos considerados na simulação realizada para a certificação energética do edifício.

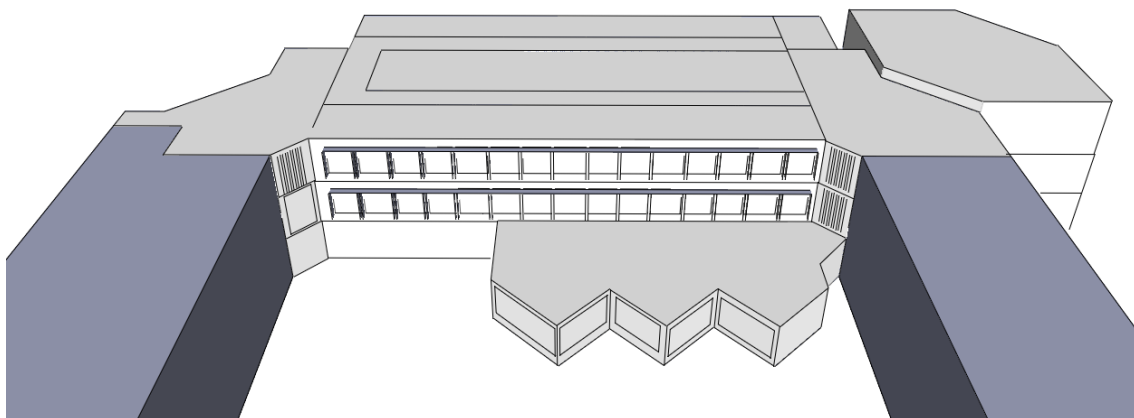


Figura 30 – Modelo de simulação da ala norte do edifício, onde se localiza a sala de estudo, vista sul;

Considerou-se que a ventilação da sala era do tipo *single sided* desprezando-se assim o facto de existirem duas portas entre a sala e o corredor.

A modelação do efeito da abertura das janelas foi feita no *EnergyPlus* e pode ser abordada de diferentes formas. Existe a possibilidade de modelar cada um dos parâmetros, térmico e eólico, de forma independente, ou pode ser considerado um objeto equivalente que engloba os dois processos. A forma como é abordada esta questão depende do grau de detalhe que se pretende, mas também pode ser limitada pelo conhecimento que se tem sobre o sistema em questão.

Neste caso foi escolhida a segunda opção recorrendo-se ao objeto do *EnergyPlus ZoneVentilation:WindAndStackOpenArea*. Através deste objeto é possível definir a área e o calendário de abertura da janela, quando é conhecido o seu horário de utilização, como no caso da monitorização, ou definir a utilização de ventilação natural em função de diversos parâmetros. Pode ser definido limite máximo ou mínimo para a temperatura interior e exterior a partir do qual não ocorrerá ventilação natural. As entradas de ar são fechadas sempre que uma das condições se verifica de modo a evitar que a ventilação natural do espaço ocorra em períodos em que as condições não são favoráveis.

Dado que os dados de vento existentes não são do vento local mas sim do vento a 30 metros de altura, onde este não se encontra perturbado, é necessário aplicar um fator de correção à velocidade do vento. A relação entre o vento local é dada pelo seguinte quociente $\frac{U_L}{U_R}$, sendo U_L a velocidade do vento local e U_R a velocidade do vento não perturbada, considerou-se para este caso que o quociente toma o valor 0.25 [58]. No dia em que se realizou a monitorização, o ângulo entre a normal à janela e o vento incidente foi em média 35°, e a sua velocidade média cerca de 4 m/s.

A equação que exprime o caudal de ventilação, \dot{Q}_V , por ação do vento pode ser reescrita na forma da expressão 29.

$$\dot{Q}_V = C_w \times A \times U_L \quad (29)$$

Sendo C_w o parâmetro adimensional que reflete os diversos fatores que influenciam o escoamento do ar através do edifício. Para situações em que a ventilação natural ocorre através de uma única abertura, este parâmetro assume o valor de 0.1 [58].

O caudal de ventilação originado pela diferença de temperaturas entre o ar exterior e interior, \dot{Q}_T , é obtido através da equação 30. O coeficiente de descarga, C_d , caracteriza a perda de carga associada á constrição de um escoamento e é característico do objeto que o fluido atravessa.

$$\dot{Q}_T = \frac{C_d}{3} \times A \times \sqrt{g \times h \frac{T_{int} - T_{ext}}{T_{médio}}} \quad (30)$$

Onde:

- g é a aceleração da gravidade;
- $T_{médio}$ a média entre a temperatura do ar interior e a temperatura do ar exterior;
- A a área de abertura por onde passa o ar;
- h a altura da janela;
- C_d o coeficiente de descarga, para uma abertura retangular adota o valor de 0.61[58].

Nas Figura 31 e Figura 32 é apresentada uma comparação entre os valores de temperatura do ar interior e de concentração de CO₂ no ar interior obtidos através da simulação do modelo dinâmico e os valores registados localmente durante a monitorização.

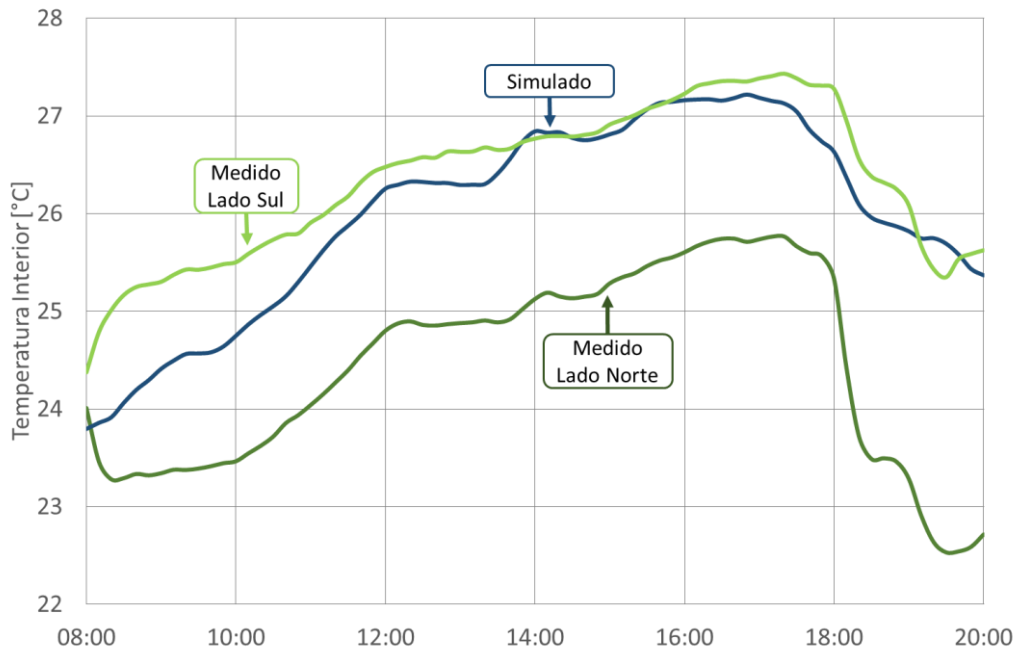


Figura 31 – Comparação entre os dados registados e os dados obtidos por simulação, temperatura do ar interior;

Como se pode verificar, os valores de temperatura do ar interior obtidos através da simulação seguem a mesma tendência dos valores registados, sendo que há uma maior aproximação aos

valores registados do lado sul da sala. O erro médio absoluto obtido é de 2.5 %, o que corresponde a um desvio de 0.7°C.

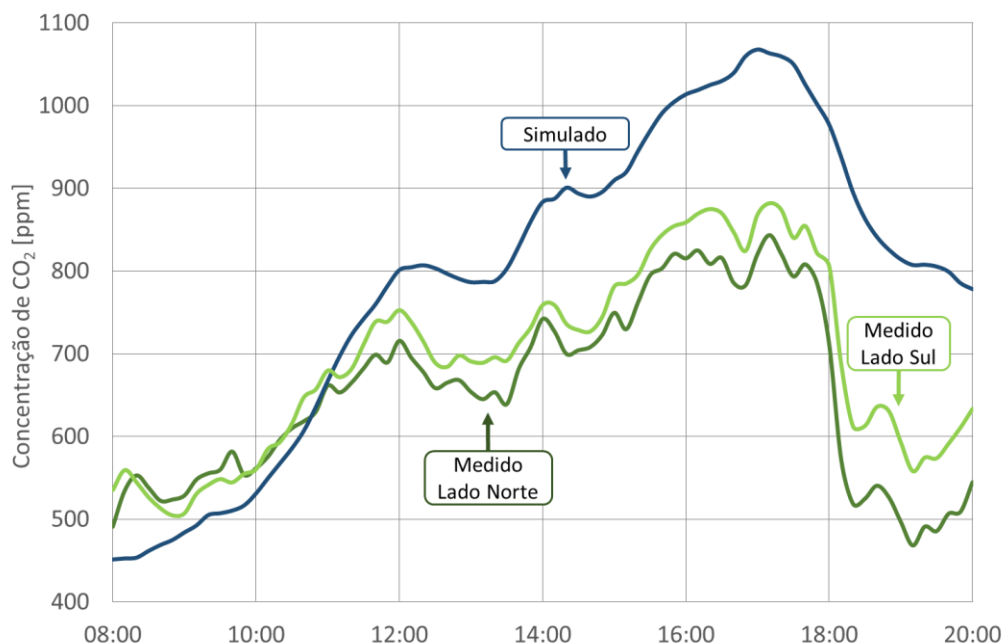


Figura 32– Comparação entre os dados registados e os dados obtidos por simulação, concentração de CO₂;

Em relação à estimativa da concentração de CO₂ no ar interior da sala, os valores obtidos através da simulação aparentam crescer de uma forma mais acentuada que os valores registados, havendo mesmo uma diferença de quase 200 ppm quando ocorre o máximo de concentração. Este facto pode indicar que o valor considerado para a emissão de CO₂ por ocupante é superior aquele que se verifica na realidade. O decréscimo da concentração de CO₂ devido à abertura das janelas é um pouco menos acentuado no modelo de simulação. Os dados obtidos através da simulação apresentam um erro médio absoluto de 20.9%, correspondentes a cerca de 140 ppm.

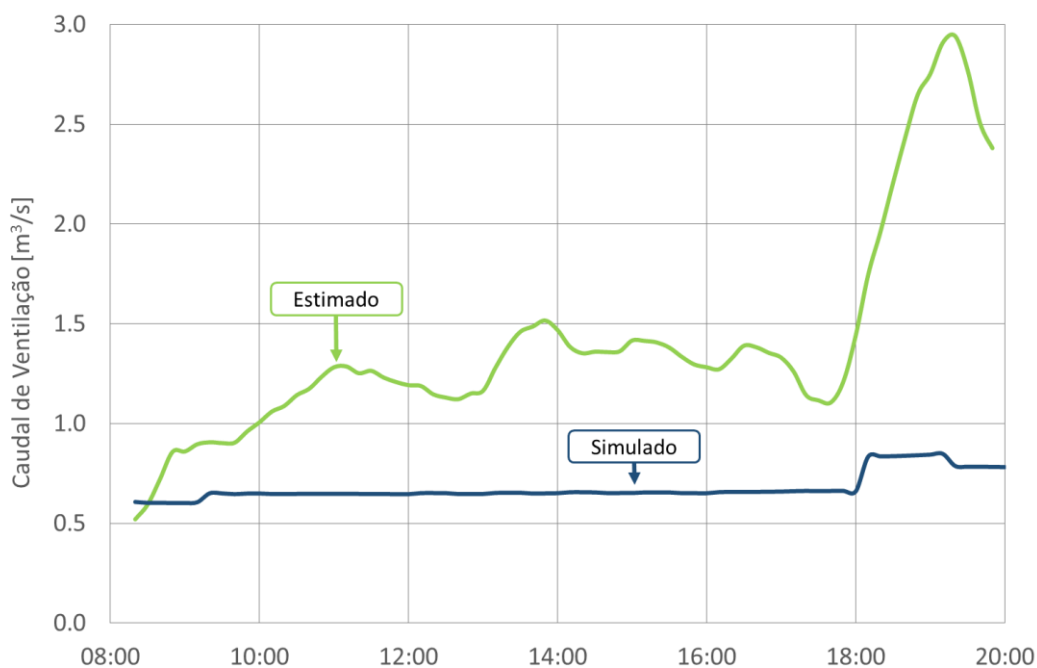


Figura 33 – Comparação entre os dados estimados e os dados obtidos por simulação, caudal de ventilação;

Na Figura 33 são apresentados os caudais obtidos através da simulação dinâmica e da estimativa apresentada na secção 6.2. Em ambos os casos é visível o impacto da abertura das janelas às 9h e às 18h, e do fecho de uma delas por volta das 19h, no entanto os seus valores são bastante díspares. Esta discrepância entre caudais pode indicar que desprezar o caudal que circula através das portas da sala não é a aproximação mais correta, pois o facto de estas se encontrarem abertas proporciona a ventilação cruzada. Desta forma é possível justificar o maior desvio da concentração de dióxido de carbono na simulação face ao valor registado na monitorização.

Para além destes parâmetros foram ainda comparadas as temperaturas superficiais das paredes interiores. Nas Figura 34 e Figura 35 é apresentada a comparação entre os valores obtidos através da simulação e os valores registados localmente para as paredes norte e sul. Para a parede sul, que se encontra em contacto com um corredor interior, foi verificado um desvio de 2.5 %, quanto à parede norte, em contacto com o exterior, o erro é de 3.0%.

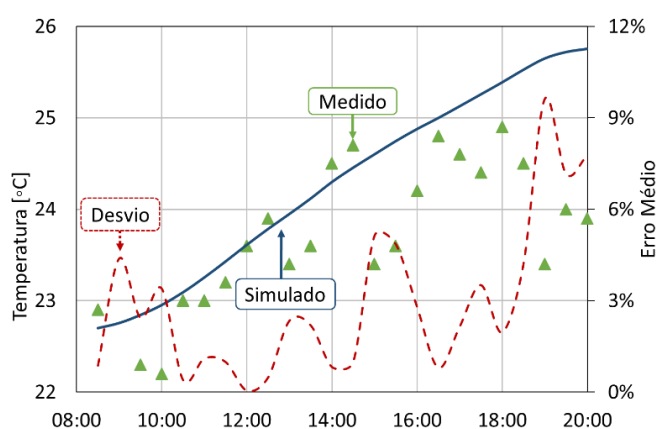


Figura 34 – Temperatura superficial da parede Norte;

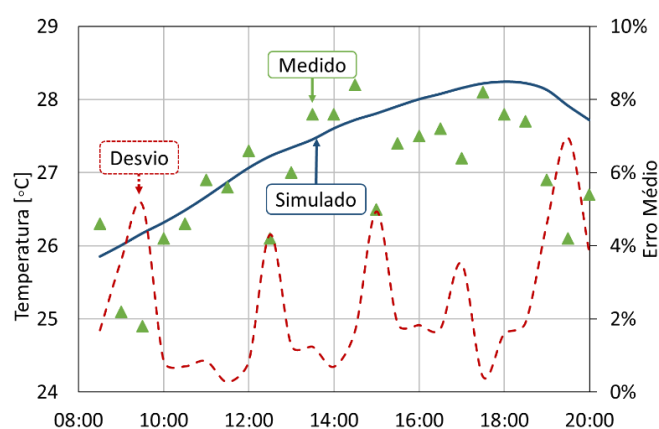


Figura 35 – Temperatura superficial da parede Sul

Tendo em conta os resultados obtidos, confirma-se a validação do modelo de simulação, podendo o mesmo ser utilizado para a previsão do consumo energético associado aos diferentes tipos de ventilação.

6.4. Avaliação do desempenho dos diferentes sistemas de ventilação

A quantificação da poupança de energia que advém da utilização de ventilação natural deve ser feita em comparação com o consumo de energia dos sistemas ditos convencionais (mecânicos). Neste capítulo será avaliado e comparado o desempenho de diversos sistemas de ventilação e climatização da sala de estudo. Os dados obtidos têm origem na simulação dinâmica do modelo validado anteriormente.

Para efeitos de simulação considerou-se que a sala dispõe de dois perfis de ocupação distintos que variam em função da altura do ano. Durante o período de avaliações a sala encontra-se ocupada durante 16 horas, das 8h às 24h, registando uma ocupação mínima de 5 pessoas e máxima de 130 pessoas. Durante o período letivo, considerou-se que o espaço tem uma menor afluência funcionando entre as 8h e as 24h, sendo a ocupação máxima de 80 pessoas. Nas férias escolares foi considerado que não existia ocupação. A sala contabiliza assim um total de 3472 horas de ocupação. Definiu-se que cada ocupante dispõe de um computador portátil.

6.4.1. Sistema Passivo

Numa primeira fase foi analisada a possibilidade de utilização um sistema passivo em que se recorre exclusivamente à ventilação natural para a renovação do ar interior da sala.

A modelação da abertura das janelas foi feita novamente através do objeto *WindAndStackOpenArea*, descrito anteriormente. Neste caso a abertura/fecho das janelas é condicionada pela temperatura interior e pela temperatura exterior. Foi considerado que as janelas se encontram abertas sempre que a temperatura interior é superior a 19°C e a temperatura exterior superior a 17°C. Não foi definido um limite superior que determine o fecho das janelas uma vez que devido aos elevados ganhos internos a temperatura interior é sempre superior à exterior, e como tal a ventilação natural favorece em todos os instantes a redução da temperatura interior. Entre os meses de Junho e Setembro, não foi imposto qualquer limite mínimo de temperatura para aproveitamento da ventilação natural. Deste modo é realizado um arrefecimento noturno da sala, que permite que no início do período de ocupação, às 8h, a temperatura da sala esteja mais próxima do limite inferior demorando assim mais tempo a atingir o limite superior de conforto.

A área de abertura considerada é equivalente à soma do total das folhas móveis inferiores das janelas da sala, totalizando 9.3 m² (0.62 m² cada). Foi avaliado o impacto da alteração da área de abertura nas condições interiores, fazendo variar a área de abertura entre um terço e o dobro da área indicada. Conclui-se que o impacto desta variação não é significativo e por isso optou-se por manter a primeira opção de modo a garantir uma ventilação mais uniforme.

Na Gráfico 6 é apresentada a distribuição da temperatura interior ao longo do ano nos períodos em que a sala se encontra ocupada. As linhas a tracejado representam os intervalos de temperatura de conforto interior considerados no regulamento português [3], entre 20°C e 25°C. No caso de edifícios híbridos ou passivos pode ser considerado um intervalo de temperaturas mais alargado, entre 19°C e 27°C.

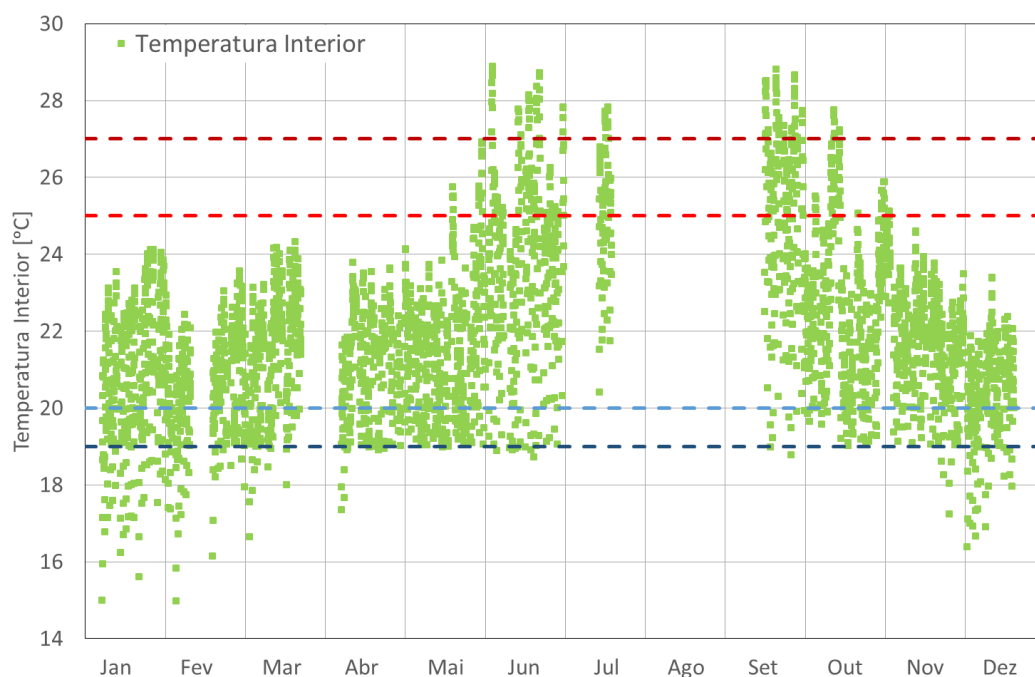


Gráfico 6 – Temperatura interior nas horas com ocupação, sistema de ventilação exclusivamente natural;

Para além da temperatura interior, foi ainda analisada a concentração de CO₂ no ar interior. Considerou-se que a sala de estudo se encontrava em condições de conforto sempre que a temperatura interior estava compreendida entre os 19°C e 27°C e a concentração média de CO₂ no ar interior nas últimas oito horas não era superior a 1625 ppm.

A temperatura mínima registada no interior da sala é de 15.0°C, sendo a máxima de 28.9°C. A concentração máxima de CO₂ verificada no ar interior é de 2519ppm, sendo superior ao limite regulamentar em 179 das horas em que o espaço se encontra ocupado. Assim, é possível afirmar que não se verificam condições de conforto interior durante 345 horas, o que corresponde a cerca de 10 % do período de ocupação. Este facto faz com que não seja viável a utilização de um sistema que se baseie exclusivamente na ventilação através de meios naturais.

6.4.2. Sistema mecânico

Uma vez que não é possível garantir as condições de conforto no interior da sala de estudo através de meios exclusivamente naturais, é pertinente aferir a energia necessária para que a temperatura interior se mantenha no intervalo desejado. No caso do sistema mecânico foi considerado o intervalo de temperaturas mais restrito, no qual a temperatura se deve situar entre os 20°C e 25°C.

No Gráfico 7 pode observar-se a variação da temperatura do ar interior da sala de estudo ao longo do ano. Uma vez que o sistema de climatização se encontra disponível durante todo o período de ocupação não existem horas em que não estejam garantidas as condições de conforto interior. O sistema de climatização é requisitado durante 60% do período de ocupação, no entanto a insuflação de ar novo é permanente, havendo por isso um maior consumo de energia durante o período em que o espaço está ocupado. O caudal de ar novo considerado corresponde ao valor definido por lei para este tipo de espaços, 24 m³/(h.pessoa) [21].

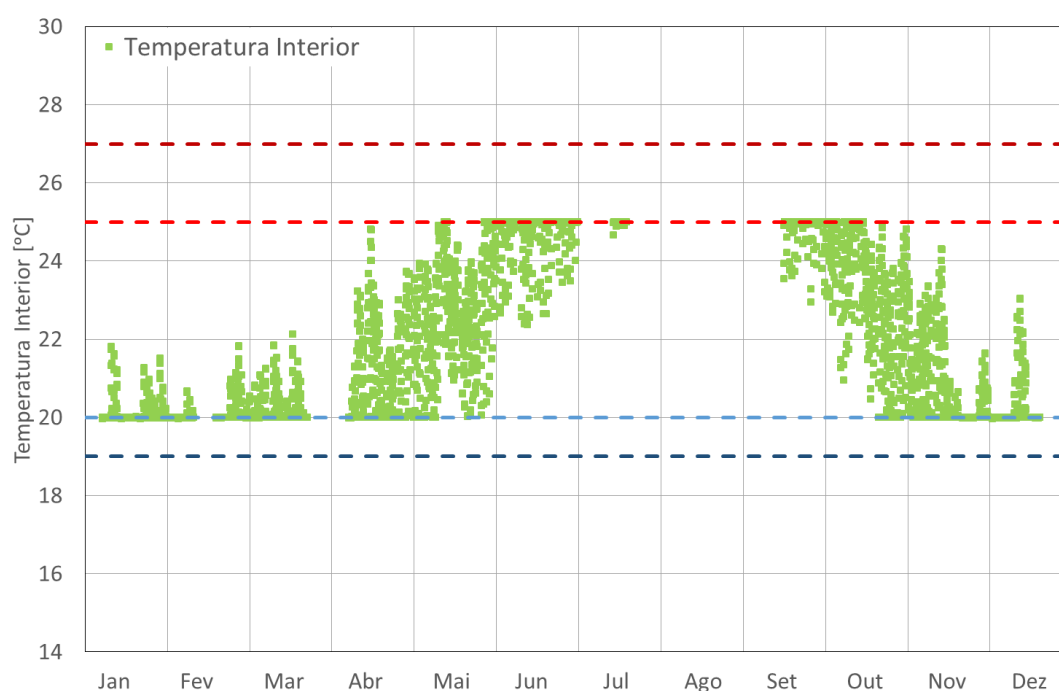


Gráfico 7 - Temperatura interior nas horas com ocupação, sistema de ventilação exclusivamente mecânico;

6.4.3. Sistema híbrido

A utilização de um sistema de ventilação híbrido resulta da combinação da ventilação natural e da ventilação mecânica. Uma vez que a utilização de um sistema exclusivamente natural não garante as condições de conforto interior exigidas durante todo o período de ocupação do espaço, é necessário recorrer a um sistema mecânico auxiliar. O sistema mecânico só deve funcionar como recurso em períodos com ocupação sendo sempre dada primazia ao uso da ventilação natural. A disponibilidade da ventilação natural durante a noite permite que seja feito o arrefecimento noturno de modo a que, durante o período com ocupação a temperatura demore mais tempo atingindo o limite superior do intervalo de conforto.

Foram realizadas duas análises distintas, uma para cada um dos intervalos de temperatura contemplados no regulamento português.

Numa primeira análise foi considerado que a temperatura interior deveria estar compreendida entre os 20°C e 25°C. Para efeitos de certificação energética do edifício esta deveria ser a temperatura considerada, uma vez que o edifício não se qualifica como híbrido por necessitar de climatização por um período superior a 30% do período de ocupação. No entanto, é aceitável uma gama de temperaturas mais alargada em edifícios que recorrem à ventilação natural [59].

A utilização de um sistema que articule ventilação natural com um sistema mecânico permite reduzir o número de horas em que é necessário recorrer ao sistema de climatização para 29% do período de ocupação. Considerou-se que eram sempre garantidas as condições de conforto interior uma vez que a diferença entre a temperatura verificada no interior e os limites de conforto não ultrapassam os 0.05°C, sendo por isso desprezável. A concentração de CO₂ nunca excede o limite regulamentar, sendo o máximo verificado de 1620 ppm.

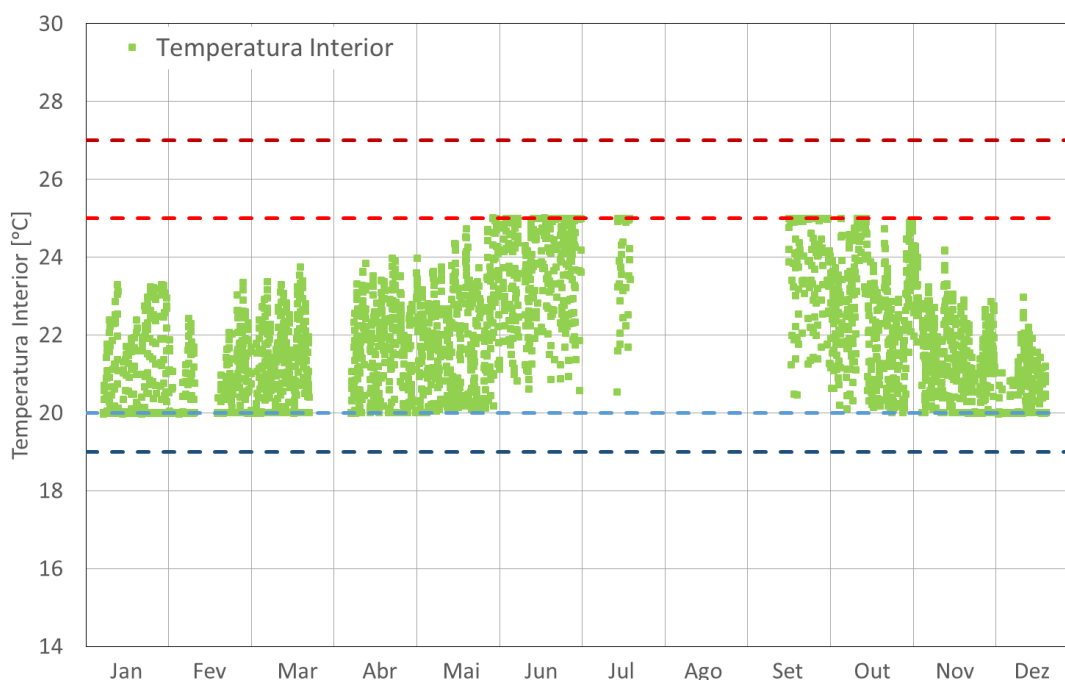


Gráfico 8 - Temperatura interior nas horas com ocupação, sistema de ventilação híbrido para um intervalo de temperaturas mais restrito;

No caso de se considerar um intervalo de temperaturas mais alargado, entre os 19°C e os 27°C (Gráfico 9), o período em que é necessário o auxílio do sistema mecânico passa para perto de metade, aproximadamente 15% das horas de ocupação. A concentração de CO₂ nunca ultrapassa o limite regulamentar apenas, registando um máximo de 1386 ppm. A diferença entre a temperatura interior e a temperatura limite de conforto inferior nunca excede os 0.02°C, como tal foi considerado que as condições de conforto interior são garantidas durante todo o período de ocupação.

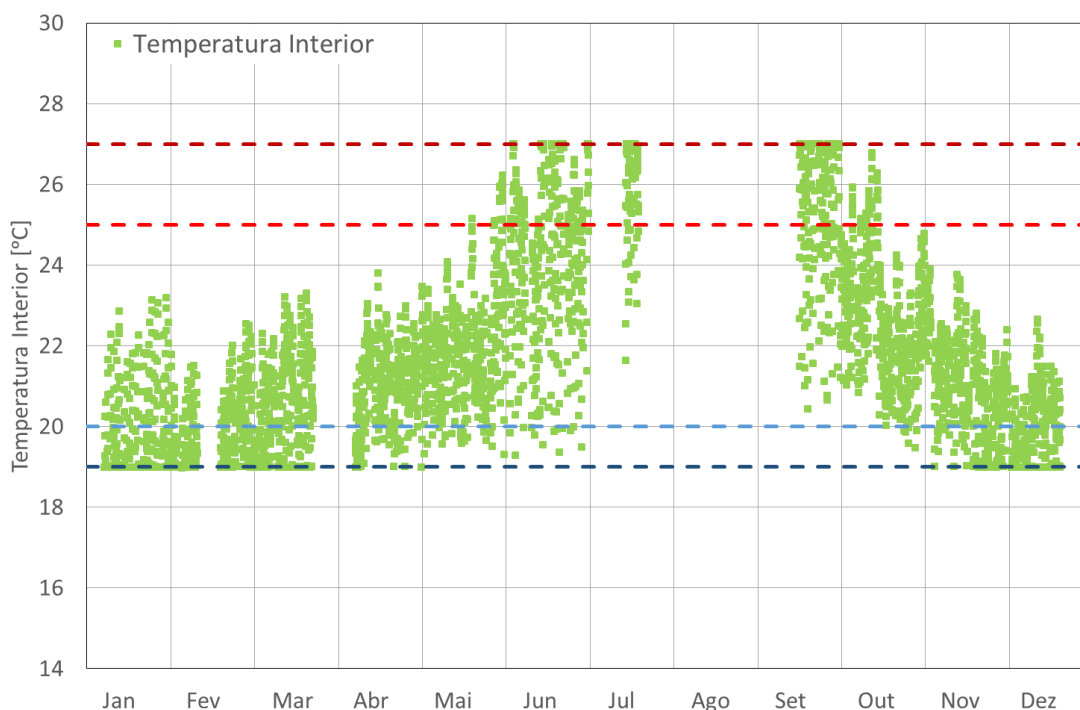


Gráfico 9 - Temperatura interior nas horas com ocupação, sistema de ventilação híbrido para um intervalo de temperaturas mais abrangente;

6.4.4. Comparação entre os sistemas avaliados

Depois de analisados individualmente os sistemas, é pertinente compará-los de modo a perceber as valências de cada um deles. A escolha de qual o melhor sistema depende sempre dos requisitos que se queiram cumprir. Se o objetivo for minimizar o consumo de energia associado à utilização do espaço, o sistema de ventilação exclusivamente natural é aquele que tem uma melhor performance, no entanto este não garante o conforto dos ocupantes. Se a premissa for a maximização das horas de conforto dos ocupantes, então o sistema com o melhor desempenho é o sistema de ventilação mecânico, no entanto este tem um elevado consumo de energia associado.

Na Tabela 20 é apresentado um resumo do desempenho dos diferentes sistemas analisados. As variáveis analisadas são:

- o consumo de energia, no qual foi contabilizada a climatização e a ventilação;
- a poupança de energia, calculada em relação ao sistema exclusivamente mecânico;
- a percentagem de horas em que é necessário recorrer ao sistema de climatização;

- a percentagem de horas em que o espaço é ventilado naturalmente;
- e a percentagem de horas em que o sistema instalado não garante as condições de conforto interior.

A sigla **P** refere-se ao sistema de passivo, **M** ao sistema mecânico de ventilação. Quanto ao sistema híbrido são apresentadas as duas alternativas testadas, **H1** para uma gama de temperaturas mais abrangente e **H2** para um regime mais restrito.

Tabela 20 – Parâmetros característicos de cada um dos sistemas

	Consumo energético [MWh]	Poupança energética [%]	Horas com climatização [%]	Horas com ocupação e VN [%]	Horas de desconforto [%]
P	0	100	0	54	10
H1	2.4	80	15	50	0
H2	5.3	50	29	35	0
M	10.8	0	60	0	0

Como se pode observar, os sistemas híbridos são aqueles que garantem um melhor equilíbrio entre o consumo de energia despendido na climatização da sala de estudo e o número de horas em que são garantidas as condições de conforto interior. Estes garantem as condições ideais de conforto interior durante todo o período de ocupação, no entanto, no cenário **H2**, o consumo de energia é cerca de 50 % do consumo de um sistema mecânico. Para o sistema híbrido **H1**, a poupança obtida é de cerca de 80 %.

Também não se verificou qualquer limitação em relação à questão da capacidade de agregação do sistema de climatização a instalar na sala de estudo ao grupo térmico integral afeto aos auditórios, uma vez que a sala de estudo tem uma ocupação significativa no período em que os auditórios têm uma maior necessidade de arrefecimento, no final do mês de Julho.

7. Conclusões

O desenvolvimento deste trabalho permitiu comprovar a importância de conhecer a utilização final da energia consumida por um edifício, pois só desta forma é possível verificar qual o peso de cada sector no consumo global e sobre que sectores devem ser estudadas medidas de eficiência energética.

Através da desagregação de consumos verificou-se que grande parte da energia consumida no Edifício I é utilizada na climatização do mesmo, cerca de 44% do consumo anual total, sendo que esta parcela deriva maioritariamente do consumo de gás por parte da caldeira. Os restantes 56% dividem-se de forma idêntica entre a iluminação e os equipamentos elétricos. Analisando o consumo anual de energia por unidade de área, que neste caso corresponde a 155 kWh/m², constatou-se que o edifício em estudo tem um consumo de energia menor do que a média europeia para edifício académicos, de 190 kWh/m².

O processo de certificação energética atribuiu ao Edifício I a classe **B-**, com um rácio de classe energética de 0.99, o que indica que o seu desempenho energético é bastante similar ao do edifício de referência. A implementação das medidas de eficiência energética estudadas permitiria uma redução do consumo de energia primário do edifício na ordem dos 575 MWh/ep, correspondentes a 35% do consumo atual de energia primária. O Edifício I passaria a ser classificado como um edifício de classe **B**. As medidas estudadas incidem sobre o sistema de iluminação e a caldeira a gás natural que fornece água quente aos radiadores, e consistem na substituição dos equipamentos existentes por equipamentos mais atuais e eficientes.

Da análise do potencial de utilização de um sistema de ventilação exclusivamente natural na Sala de Estudo, concluiu-se que não são garantidas as condições de conforto interior durante 10% do tempo de ocupação. Como tal, considerou-se que a utilização deste tipo de sistemas não é viável para a Sala de Estudo. Um sistema convencional consegue garantir as condições de conforto durante todo o tempo de ocupação, no entanto origina um consumo de energia anual de 10.8 MWh. Como alternativa ao sistema mecânico, foi também avaliado o desempenho de um sistema híbrido, no qual é dada primazia ao sistema de ventilação natural e o sistema mecânico apenas é utilizado como opção de recurso. Nesta avaliação consideraram-se dois cenários de condições de conforto interior, sendo que a poupança de energia face ao sistema mecânico convencional varia entre os 50% e os 80%, dependendo do intervalo de temperaturas interior em questão.

Visto que grande parte dos espaços do edifício carece de um sistema de ventilação, seria pertinente avaliar a disponibilidade dos mesmos para dispor de um sistema de ventilação natural.

Bibliografia

- [1] European Comission, "Addressing the Impact of the Financial Crisis on EU - Russia Energy Cooperation Final Report," 2009.
- [2] "PORDATA - Consumo final por tipo de sector consumidor." [Online]. Available: <http://www.pordata.pt/Europa/Ambiente+de+Consulta/Tabela>. [Accessed: 07-Apr-2015].
- [3] M. D. E. E. Do Emprego, "Portaria n.º 349-D/2013," *Diário da República*, no. 40, pp. 40–73, 2013.
- [4] "2_06_ConductionConvectionRadiation.jpg (200×239)." [Online]. Available: http://www.commercialwindows.org/images/2_06_ConductionConvectionRadiation.jpg. [Accessed: 18-Mar-2015].
- [5] "Transferência de Calor." [Online]. Available: http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=248&Itemid=422#3. [Accessed: 09-Mar-2015].
- [6] "PassivHaus | archihaus." [Online]. Available: <http://www.archihaus.co.uk/passivhaus/>. [Accessed: 18-Mar-2015].
- [7] P. Lubina and M. B. Nantka, "Internal Heat Gains in Relation To the Dynamics of Buildings," 2009.
- [8] K. Flodberg, Å. Blomsterberg, and M.-C. Dubois, "Low-energy office buildings using existing technology: simulations with low internal heat gains," *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 3, no. 1, p. 19, Sep. 2012.
- [9] A. C. D. F. Diogo, "Sistemas Envidraçados com e sem Protecção Solar," *Diss. para a obtenção do Grau Mestre em Arquit.*, 2012.
- [10] M. Perino, "State of the art review Vol.1. State of the art report," *Integr. Environ. Responsive Elem. Build.*, 2008.
- [11] N. M. Mateus, A. Pinto, and G. C. Da Graça, "Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell," *Energy Build.*, vol. 75, pp. 511–522, 2014.
- [12] "EnergyPlus Energy Simulation Software: Weather Data." [Online]. Available: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm?CFID=3075822&CFTOKEN=c2b3fbeb9ccb9aeb-66A8FD8F-A794-C049-D192868DD63C5EA2&jsessionid=2E1833E06DB9F78336CFF3022FF56059.eere. [Accessed: 20-Apr-2015].
- [13] "LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia." [Online]. Available: <http://www.lneg.pt/servicos/328/2263/>. [Accessed: 11-Mar-2015].

- [14] U. D. O. Energy, "EnergyPlus Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations," *US Dep. Energy*, p. 1051, 2010.
- [15] EnergyPlus, "Input/output reference: The encyclopedic reference to EnergyPlus input and output," vol. 2013, 2009.
- [16] J. Kim and R. De Dear, "How does occupant perception on specific IEQ factors affect overall satisfaction ?," *Proc. 7th Wind. Conf. Chang. Context Comf. an unpredictable world*, no. April, pp. 12–15, 2012.
- [17] J. Kim and R. de Dear, "Nonlinear relationships between individual IEQ factors and overall workspace satisfaction," *Build. Environ.*, vol. 49, pp. 33–40, 2012.
- [18] "Elevated Indoor Carbon Dioxide Impairs Decision-Making Performance | Berkeley Lab." [Online]. Available: <http://newscenter.lbl.gov/2012/10/17/elevated-indoor-carbon-dioxide-impairs-decision-making-performance/>. [Accessed: 13-Mar-2015].
- [19] T. M. Stafford, "Indoor air quality and academic performance," *J. Environ. Econ. Manage.*, vol. 70, pp. 34–50, Dec. 2014.
- [20] K. Al-Rashidi, D. Loveday, and N. Al-Mutawa, "Impact of ventilation modes on carbon dioxide concentration levels in Kuwait classrooms," *Energy Build.*, vol. 47, pp. 540–549, Apr. 2012.
- [21] M. D. E. E. Do Emprego, "Portaria n.º 353-A/2013," *Diário da República*, no. 2, 2013.
- [22] R. Ramponi, A. Angelotti, and B. Blocken, "Energy saving potential of night ventilation: Sensitivity to pressure coefficients for different European climates," *Appl. Energy*, vol. 123, pp. 185–195, Jun. 2014.
- [23] D. Etheridge, "A Perspective on Fifty Years of Natural Ventilation Research," *Build. Environ.*, Mar. 2015.
- [24] C.-R. Chu and B.-F. Chiang, "Wind-driven cross ventilation in long buildings," *Build. Environ.*, vol. 80, pp. 150–158, Oct. 2014.
- [25] "Wind Ventilation | Sustainability Workshop." [Online]. Available: <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/wind-ventilation>. [Accessed: 23-Apr-2015].
- [26] T. S. Larsen and P. Heiselberg, "Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference," vol. 40, pp. 1031–1040, 2008.
- [27] "BSI-075: How Do Buildings Stack Up? — Building Science Information." [Online]. Available: <http://www.buildingscience.com/documents/insights/bsi-075-how-do-buildings-stack-up>. [Accessed: 18-Mar-2015].
- [28] R. Li, a. Pitts, and Y. Li, "Buoyancy-driven natural ventilation of a room with large openings," *Build. Simul.*, pp. 984–991, 2007.

- [29] Z. Li, P. Heiselberg, and P. V Nielsen, "Characteristics of Buoyancy Driven Single-Sided Natural Ventilation through Horizontal Openings," 2005.
- [30] "Green Building Tech - Natural Ventilation." [Online]. Available: <http://gbtech.emsd.gov.hk/english/utilize/natural.html>. [Accessed: 18-Mar-2015].
- [31] H. B. Awbi, *Ventilation of Buildings*. Routledge, 2013, p. 536.
- [32] H. Wang and Q. Chen, "A new empirical model for predicting single-sided, wind-driven natural ventilation in buildings," *Energy Build.*, vol. 54, pp. 386–394, Nov. 2012.
- [33] C.-A. Roulet, F. . Heidt, F. Foradini, and M.-C. Pibiri, "Real heat recovery with air handling units," *Energy Build.*, vol. 33, no. 5, pp. 495–502, May 2001.
- [34] "Electrical, Plumbing and Gas Contractors Wigan, Renewable Energy Wigan."
- [35] M. D. E. E. Do Emprego, "Decreto-Lei n.º 118/2013," *Diário da República*, vol. 159, pp. 4988–5005, 2013.
- [36] M. D. E. E. Do Emprego, "Despacho n.º 15793-E/2013," *Diário da República*, no. 14, pp. 14–25, 2013.
- [37] "Bing Maps - Driving Directions, Traffic and Road Conditions." [Online]. Available: <http://www.bing.com/maps/#Y3A9cWZyN3dqZzczZHRkJmx2bD0xOC4zOCZkaXI9My4xJnN0eT1iJnRtPSU3QiUyMldlbGNvbWVQYW5lbFRhc2sIMjQIMjQwJTlyJTNBbnVsbCU3RA=>. [Accessed: 18-Mar-2015].
- [38] "Mapa do Sítio - ISCTE-IUL - ISCTE - Instituto Universitário de Lisboa." [Online]. Available: <https://fenix.iscte.pt/siteMap.do>. [Accessed: 19-Apr-2015].
- [39] ITE-50, "Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios," Lisboa, 2006.
- [40] A. Yildiz and A. Güngör, "Energy and exergy analyses of space heating in buildings," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 10, pp. 1939–1948, Oct. 2009.
- [41] C. H. Bemisderfer, A. C. Kent, and J. T. Leroy, *2001 ASHRAE Handbook: Fundamentals*. 2001, p. 892.
- [42] R. C. Resources, "F09 SI: Thermal Comfort," *ASHRAE Handb. Fundam.* 2013, pp. 9.1–9.30, 2013.
- [43] ASHRAE, *2009 Ashrae Handbook: Fundamentals*, vol. 30329, no. 404. 2009, p. 926.
- [44] ["http://www.otis.com/site/pt/OT_DL_Documents/OT_DL_DownloadCenter/Poupan%C3%A7a/Catalogo_Poupan%C3%A7a.pdf."](http://www.otis.com/site/pt/OT_DL_Documents/OT_DL_DownloadCenter/Poupan%C3%A7a/Catalogo_Poupan%C3%A7a.pdf)
- [45] A. Thewes, S. Maas, F. Scholzen, D. Waldmann, and A. Zürbes, "Field study on the energy consumption of school buildings in Luxembourg," *Energy Build.*, vol. 68, pp. 460–470, 2014.

- [46] a Markus, "High Performance Commercial Building Systems Energy Efficiency Indicators for High Electric-Load Buildings," no. 53478, 2003.
- [47] G. Carrilho Da Graça, N. R. Martins, and C. S. Horta, "Thermal and airflow simulation of a naturally ventilated shopping mall," *Energy Build.*, vol. 50, pp. 177–188, 2012.
- [48] N. M. Mateus and G. Carrilho da Graça, "A validated three-node model for displacement ventilation," *Build. Environ.*, vol. 84, pp. 50–59, Jan. 2015.
- [49] M. Economidou, B. Atanasiu, C. Despret, and J. Maio, *Europe's buildings under the microscope*. 2011.
- [50] Aalto University School of Science and Technology Department of Electronics Lighting Unit, "Chapter 2 : Lighting energy in buildings," *Guideb. Energy Effic. Electr. Light. Build.*, pp. 17–40, 2010.
- [51] EN12464, "EN 12464 - Light and lighting," *BSI Stand. Publ.*, 2011.
- [52] M. D. E. E. Do Emprego, "Despacho n.º 15793-J/2013," *Diário da República*, no. 55, pp. 55–57, 2013.
- [53] M. D. E. E. Do Emprego, "Despacho n.º 15793-D/2013," *Diário da República*, no. 13, p. 35088, 2013.
- [54] F. J. C. Ramalheira, "Manual de boas práticas de escolha de vãos envidraçados," *Mestr. / Espec. em Construção Edifícios - Fac. Eng. da Univ. do Porto*, 2005.
- [55] "Lâmpadas Tubulares de Conservação Energética T5 – Projecto experimental," *Gab. para o Desenvol. do Sect. Energético*, pp. 1–10, 2010.
- [56] "PremiumLight - Familiarize-se com os princípios básicos de iluminação." [Online]. Available: <http://www.premiumlight.eu/index.php?page=lighting-basics-9>. [Accessed: 18-Mar-2015].
- [57] A. K. Persily, "Evaluating building IAQ and ventilation with indoor carbon dioxide," *ASHRAE Transactions*, vol. 103. pp. 193–204, 1997.
- [58] P. R. Warren, "The analysis of single-sided ventilation measurements," *Air Infiltration Rev.*, vol. 7, no. 2, 1986.
- [59] J. Hummelgaard, P. Juhl, K. O. Sæbjørnsson, G. Clausen, J. Toftum, and G. Langkilde, "Indoor air quality and occupant satisfaction in five mechanically and four naturally ventilated open-plan office buildings," *Build. Environ.*, vol. 42, no. 12, pp. 4051–4058, Dec. 2007.
- [60] J. a. Duffie and W. a. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes (Google eBook)*. 2013, p. 936.



RHE20 SI ER HPR - LLumar

CERTIFICADO DE QUALIDADE ISO 9001 (CERTIFICADO #FM 35957)

Tipo de Vidro

4/12/4 mm**

* Simples, incolor ** Duplo, incolor

4mm*

Total Transmissão Solar 11%

9%

Total Reflexão Solar 62%

62%

Total Absorção Solar 27%

28%

Luz Visível Transmitida 14%

13%

Luz Visível Reflectida (interna) 63%

61%

Luz Visível Reflectida (externa) 64%

64%

Transmissão Ultravioleta <1%

<1%

Coef. Tran. Energia (Valor g) 0,175

0,142

Coef. de Sombra 0,201

0,163

Valor u (EN 673, W / m2K) 5,8

2,9

Redução do Encandeamento 84%

85%

Rejeição Total Energia Solar 82%

86%

Emissividade

0.70

Cor da Película

Prata

Espessura da Película

45µ

Protecção Anti-Risco

Sim

Protecção Anti-Graffiti

Sim

Benefícios Gerais:

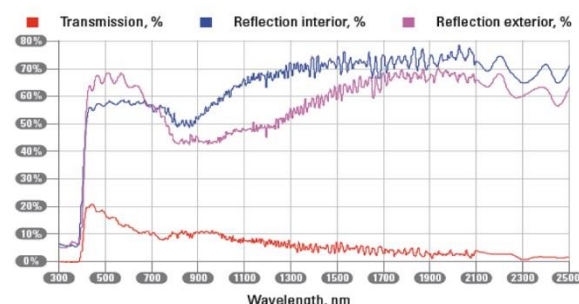
- ✓ Faz parte da Gama de Películas de Controlo Solar de aplicação Exterior **Helios**.
- ✓ A construção base da Película LLumar Helios assenta num polímero híbrido, patenteado, com várias camadas entrelaçadas, garantindo uma perfeita protecção e estabilidade da radiação UV.
- ✓ Melhoria significativa das condições de trabalho - elevada redução do ganho solar
- ✓ Redução dos custos com ar-condicionado e consequente redução de custos energéticos e emissões de CO₂
- ✓ Retorno do Investimento no prazo bastante razoável de 5 anos
- ✓ Privacidade - durante o dia permite ver para fora sem ser visto
- ✓ Excelente redução do encandeamento e diminuição da tensão ocular
- ✓ Elevada filtragem no interior da película dos Raios UV reduzindo a descoloração de tecidos, mobiliário e obras de arte
- ✓ Camada protectora anti-risco: incremento da longevidade e facilidade de limpeza
- ✓ Extremamente bem adaptada a vidros isolantes

Aplicações:

- ✓ Ideal para Fachadas de Edifícios em Geral e Escritórios

Para mais informações consulte o nosso Departamento Comercial

RHE20 SI ER HPR Spectra



All values for engineering parameters are determined by the manufacturer and independent testing laboratories.

Garantia De Fábrica: A garantia é de 7 anos para instalações em vidros verticais e 5 anos para instalações em vidros inclinados e é válida para aplicações exteriores apenas. A vedação da película com silicone é obrigatória para validar esta garantia. A garantia cobre: fissuras, descolagem, desmetalização, descasque. Defeitos de fabrico, embora raros, também estão cobertos por esta garantia. Por favor contacte a Sotermica, Lda para garantia especial quando os vidros estiverem a 20 graus ou menos da



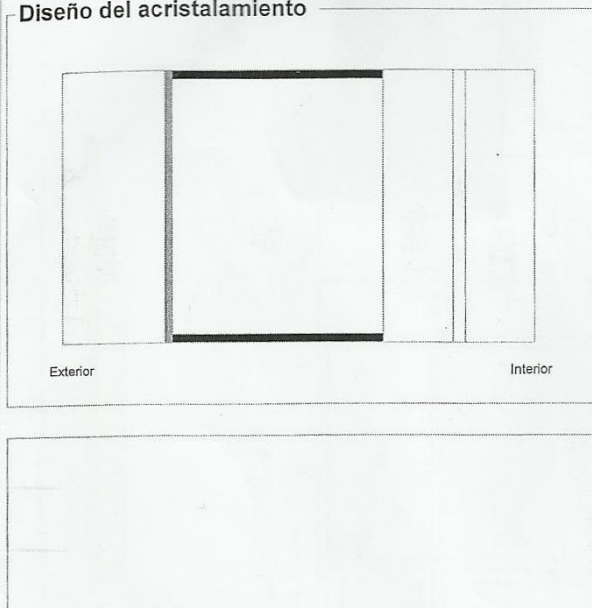
Sotermica, Lda - Importador Nacional Exclusivo | Rua Almada Negreiros, N.º 2 B - Bº de S. Francisco 2680-477 Camarate
Tel: 219 474 098 * Fax: 219 474 794 E-mail: arquitectura@sotermica.pt | www.sotermica.pt www.LLumar.pt

Anexo II



viernes, 26 de noviembre de 2010

Diseño del acristalamiento



	Primera hoja	Segunda hoja
Gas		Air 12mm
Capa		
Primera hoja	PLANILUX 6mm	PLANILUX 4mm
Capa	COOL-LITE SKN 165 II	
Película		PVB standard 0,76 mm
Capa		
Segunda hoja		PLANILUX 4mm
Capa		

Tamaños de fabricación

Espesor nominal : 26,8 mm
Peso : 35,8 kg/m²

Factores luminosos

Transmitancia : 59 %
Reflexión exterior : 15 %
Reflexión interior : 17 %

Factores energéticos EN 410

Transmitancia : 28 %
Reflexión exterior : 31 %
Reflexión interior : 28 %
Absorción A1 : 38 %
Absorción A2 : 4 %

Factor solar g : 0,33
Shading coefficient : 0,38

Transmisión térmica - 0° related to vertical position

Ug : 1,6 W/(m²/K)



Calumen'Il

Joaquim Timas
ASMEFA
Orçamentos
Rua do Casal Novo nº 9
2710-023

Sintra

Teléfono : 219156960
Móvil :
Fax : 219156969
jtimas@asmefa.pt

CALUMEN II es un programa de cálculo de las principales prestaciones espectro-fotométricas y térmicas de los acristalamientos como pueden ser la transmisión luminosa (TL), el factor solar (g) y la transmitancia térmica (U). Los valores facilitados por CALUMEN II son a título indicativo y bajo reserva de modificación. Estos valores están calculados según las normas EN 410 y EN 673 con las tolerancias definidas en EN 1096-4 y no pueden ser utilizados como garantía del comportamiento de los acristalamientos en las condiciones finales de uso.

El usuario debe imperativamente verificar la posibilidad real de combinar productos y de forma muy especial la combinación de capas, sustratos de diferente color y espesores, así como la disponibilidad comercial de la combinación realizada. Saint-Gobain declina cualquier responsabilidad derivada del uso incorrecto de este programa.

Es responsabilidad del usuario verificar que la combinación de vidrios realizada es apta para la aplicación y el uso previsto y cumple con las exigencias reglamentarias que le sean exigibles a nivel nacional, autonómico o local.

Anexo III

4.1 GENERAL TECHNICAL DATA

NECS-N B

SIZE		1314	1414	1614	1716	1816	2016	2116
NECS-N /B								
COOLING								
	(1)							
Cooling capacity	kW	339	363	396	435	478	526	546
Total power input (unit)	kW	126	132	151	165	178	190	198
EER		2,97	3,03	2,84	2,89	2,99	3,05	3,03
ESEER		3,8	3,88	3,79	3,88	3,78	3,89	3,91
Heat exchanger water flow	m³/h	58,4	62,6	68,2	74,9	82,2	90,5	94,0
Heat exchanger pressure drop	kPa	49,5	43,4	51,7	35,3	42,6	39,3	42,4
NECS-N /B								
HEATING								
	(2)							
Heating capacity	kW	371	398	436	473	515	572	597
Total power input (unit)	kW	122	130	143	157	171	187	194
COP		3,36	3,38	3,33	3,30	3,37	3,38	3,39
Heat exchanger water flow	m³/h	64,5	69,2	75,7	82,2	89,4	99,4	104
Heat exchanger pressure drop	kPa	60,3	53,1	63,6	42,5	50,4	47,5	51,7
NECS-N /D /B								
COOLING WITH PARTIAL RECOVERY								
	(3)							
Cooling capacity	kW	352	377	411	451	496	545	567
Total power input (unit)	kW	122	128	147	159	172	184	192
Heat exchanger water flow	m³/h	58,4	62,6	68,2	74,9	82,2	90,5	94,0
Heat exchanger pressure drop	kPa	49,5	43,4	51,7	35,3	42,6	39,3	42,4
Heat recovery thermal capacity	kW	102	107	124	134	143	154	161
Heat exchanger recovery water flow	m³/h	17,7	18,6	21,6	23,4	24,8	26,7	27,9
Plant side heat exchanger recovery pressure drop	kPa	36,8	35,0	47,2	36,6	41,2	35,1	35,1
COMPRESSORS								
Number	N°.	4	4	4	6	6	6	6
Number of capacity	N°.	4	4	4	6	6	6	6
Number of circuits	N°.	2	2	2	3	3	3	3
Type of regulation	STEPS	STEPS	STEPS	STEPS	STEPS	STEPS	STEPS	STEPS
Minimum capacity steps	%	25	25	25	17	17	17	17
Type of refrigerant		R410A	R410A	R410A	R410A	R410A	R410A	R410A
Refrigerant charge	kg.	78	84	84	96	108	120	126
Oil charge	kg.	25	25	25	39	38	38	38
FANS								
Number	N°.	6	6	6	7	9	9	9
Air flow	m³/s	36,0	34,6	34,6	39,5	53,1	51,1	51,9
Singol power input	kW	2	2	2	2	2	2	2
NOISE LEVELS								
	(4)							
Total sound power	dB(A)	96	96	96	96	97	97	97
Total sound pressure	dB(A)	64	64	64	64	65	65	65
DIMENSIONS AND WEIGHTS								
	(5)							
Length	mm.	3905	3905	3905	4515	5690	5690	5690
Width	mm.	2260	2260	2260	2260	2260	2260	2260
Height	mm.	2450	2450	2450	2450	2450	2450	2450
Weight	kg.	3170	3250	3280	4220	4610	4740	4810

Anexo IV

O cálculo da radiação direta normal e da radiação difusa horizontal foi com base nos valores medidos da radiação global horizontal e de acordo com as equações 29 a 34 [60]. A radiação solar incidente numa superfície horizontal no exterior da atmosfera é dada pela equação 31.

$$I_0 = G_{sc} \left[1 + 0.33 \cos \left(\frac{360 \times n}{365} \right) \right] \times [\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta] \quad (31)$$

Onde:

- G_{sc} é a constante solar, 1367 W/m²;
- n o dia juliano;
- φ a latitude;
- δ a declinação solar;
- ω o ângulo horário;

A relação entre a radiação solar extraterrestre (I_0) e a radiação global incidente numa superfície horizontal (I) determina o índice de claridade (k_T) que é dado pela equação 32.

$$k_T = \frac{I}{I_0} \quad (32)$$

A radiação difusa horizontal (I_{dif}) é obtida em função do índice de claridade e da radiação global horizontal através das equações 33, 34 e 35.

$$\frac{I}{I_{dif}} = \begin{cases} 1 - 0.09 k_T & \text{para } k_T \leq 0.22 \end{cases} \quad (33)$$

$$\frac{I}{I_{dif}} = \begin{cases} 0.9511 - 0.1604 k_T + 4.388 k_T^2 - 16.638 k_T^3 + 12.336 k_T^4 & \text{para } 0.22 < k_T \leq 0.8 \end{cases} \quad (34)$$

$$\frac{I}{I_{dif}} = \begin{cases} 0.165 & \text{para } k_T > 0.8 \end{cases} \quad (35)$$

A radiação direta incidente na horizontal ($I_{dir.horizontal}$) é obtida através da subtração da radiação difusa á radiação global horizontal. Para se obter a radiação direta normal faz-se o produto entre a radiação direta horizontal e o seno da altura solar (α).

$$I_{dir.horizontal} = I - I_{dif} \quad (36)$$

$$I_{dir.normal} = I_{dir.horizontal} \times \sin \alpha \quad (337)$$

Os diferentes parâmetros de radiação foram calculados numa base horária e o perfil de radiação obtido é o exposto na Figura 36.

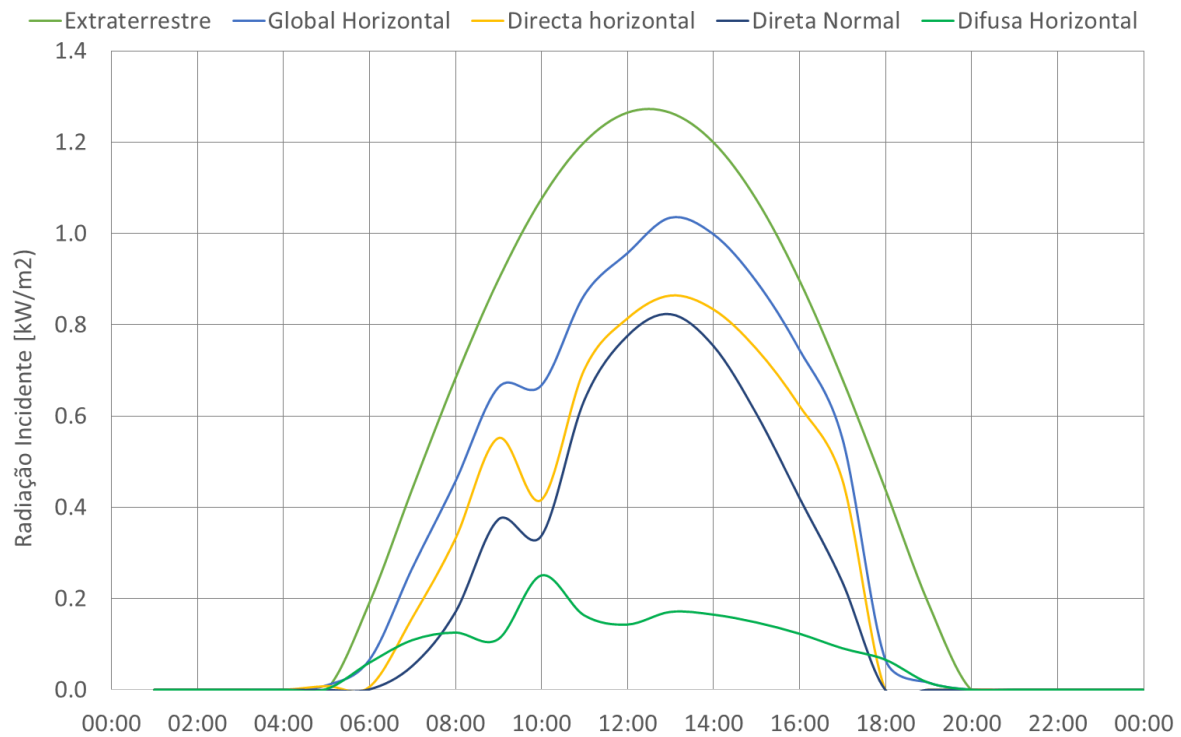


Figura 36 – Perfil de radiação obtido para o dia 3 de Junho de 2014;

